

# **AVALIAÇÃO DE NÍVEIS DE INUNDAÇÃO EM ZONAS COSTEIRAS. APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO.**

**GISELA SOFIA MONTEIRO DA SILVA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Francisco Taveira Pinto

---

Coorientadora: Doutora Raquel Castro Alves Ferreira da Silva

JUNHO DE 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2014/2015 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais.

*I have not failed. I've just found 10.000 ways that won't work.*

*Thomas A. Edison*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Francisco Taveira Pinto pelo incentivo e motivação e, sobretudo, por todo o conhecimento transmitido, essencial, para que esta dissertação tivesse a maior qualidade possível.

À Eng.<sup>a</sup> Raquel Silva, pela ajuda prestada nas várias tarefas necessárias ao desenvolvimento do trabalho.

Gostaria também de agradecer ao Professor Paulo Rosa Santos por toda a disponibilidade que teve para o esclarecimento de dúvidas que foram surgindo ao longo da dissertação.

À Professora Isabel Ribeiro por toda a ajuda e tempo despendido para compreensão do funcionamento do *MatLab*.

Aos meus pais, por todo o amor e pelo incansável apoio em todas as etapas da minha vida, sem eles nada seria possível.

Ao meu namorado, Filipe Clemente, por toda a paciência e apoio para que nunca perdesse a motivação para a conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo João Macedo que foi, sem dúvida, a pessoa que mais me acompanhou ao longo destes cinco anos de vida académica, obrigada por todos os conselhos e pela amizade sincera.

Aos meus colegas de Hidráulica por toda a amizade e companheirismo demonstrado ao longo desta fase tão importante para cada um de nós.

E por último, mas não menos importante, à D. Esmeralda Miguel por toda a preocupação e pelas palavras certas nos momentos menos bons.



## **RESUMO**

Em Portugal, sabe-se que ocorrem com alguma frequência inundações em zonas costeiras, especialmente nas que se encontram mais vulneráveis à subida (temporária) do nível do mar. Estas inundações ocorrem frequentemente durante temporais marítimos e/ou períodos de marés vivas.

Apresenta-se neste trabalho uma metodologia de cálculo de cota de inundação em zonas costeiras baseada no *Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español* (AILPE). Assume-se que a cota de inundação resulta de três principais contribuições: a maré, a sobrelevação de origem meteorológica e o espraçamento, sendo que cada uma delas é analisada individualmente. São calculados os regimes médios e extremos de níveis de maré e comparados estes com outros estudos já realizados no mesmo âmbito.

Relativamente ao galgamento em estruturas marítimas não só são apresentadas várias formulações empíricas aplicáveis às estruturas mais comuns como também é estudada a aplicabilidade de uma ferramenta de cálculo baseada em redes neuronais cujo objetivo é a quantificação do caudal médio de galgamento.

Quanto aos resultados obtidos, é importante ter presente a proximidade dos resultados com estudos de outros autores, todas as simplificações adotadas e ainda a consideração de outros parâmetros que certamente influenciariam o resultado final uma vez que se trata de um fenómeno de elevada complexidade, não só pelo grande número de fatores que intervêm no processo, como também pela interação entre os mesmos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Maré, Sobrelevação Meteorológica, Espraçamento, Cota de Inundação, Galgamento.





## ABSTRACT

In Portugal, it is known that coastal areas are flooded quite often, especially those which are more susceptible to the (temporary) sea level rise. These floods frequently occur during storms and/or high tide periods.

It will be presented, in this work, a calculation methodology of flood elevation on coastal areas based on *Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español* (AILPE). It is assumed that the flood elevation is the result of three main contributions: tide, storm surge and run-up, being each one of them analysed independently. Extreme and average regimes of tide levels are determined and compared with others from previous studies made in the same field.

Regarding the overtopping in maritime structures, not only empirical formulations applicable to the most prevailing structures are presented, but also the appropriateness of a calculation tool based on neural networks in order to quantify the average overtopping flow is studied.

About the obtained results, it is important to consider the similarity of this results compared with studies from other authors, all the adopted simplifications and also the deliberation of other parameters that surely would have influenced the final result as this is a highly complex phenomenon, not only due to the large number of elements that are involved in the process, but also due to the interaction between themselves.

**KEYWORDS:** Tide, storm surge, *run-up*, inundation level, overtopping.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE GERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS.....</b>	<b>XI</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>2.NÍVEIS DE INUNDAÇÃO EM ZONAS COSTEIRAS .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. NÍVEIS DE INUNDAÇÃO EM ZONAS COSTEIRAS.....</b>	<b>3</b>
2.2.1. MARÉ ASTRONÓMICA.....	3
2.2.2. SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA .....	4
2.2.2.1. Influência do Vento.....	5
2.2.2.2. Influência das Pressões Atmosféricas .....	6
2.2.3. PREVISÃO DE MARÉS.....	7
2.2.4. NÍVEIS DE MARÉ .....	9
2.2.4.1. Regime Médio dos Níveis de Maré .....	10
2.2.4.2. Regime de Extremos dos Níveis de Maré.....	12
2.2.5. AGITAÇÃO MARÍTIMA.....	15
2.2.6. COTA DE INUNDAÇÃO .....	16
2.2.7. <i>RUN-UP</i> EM PRAIAS.....	19
<b>2.3. GALGAMENTOS EM ESTRUTURAS MARÍTIMAS.....</b>	<b>22</b>
2.3.1. INTRODUÇÃO .....	22
2.3.2. CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO .....	23
2.3.2. GALGAMENTO DE ESTRUTURAS MAIS COMUNS.....	25
2.3.2.2. Quebramares com Taludes Rugosos .....	27
2.3.2.3. Quebramares Impermeáveis com Defletor .....	29

2.3.2.4. Quebramares Permeáveis com Defletor .....	31
2.3.2.5. Paramentos Verticais .....	33
2.3.2.6. Quebramares Mistos .....	34
2.3.3. FERRAMENTA DE CÁLCULO NN_OVERTOPPING2 .....	36
<b>3.CASO DE ESTUDO: TROÇO CAMINHA-ESPINHO .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. DINÂMICA E EVOLUÇÃO COSTEIRA .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. PLANO DE ORDENAMENTO DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO .....</b>	<b>43</b>
3.3.1. OBJETIVOS .....	43
3.3.2. EXECUÇÃO DO POOC.....	44
3.2. DIFICULDADES DE EXECUÇÃO .....	45
<b>3.4. TEMPORAIS DO INVERNO DE 2014 .....</b>	<b>45</b>
3.4.1. INTRODUÇÃO .....	45
3.4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS SITUAÇÕES MAIS GRAVOSAS.....	46
<b>4.APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AO CASO DE ESTUDO</b>	<b>53</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2. NÍVEIS DE MARÉ NO TROÇO COSTEIRO CAMINHA-ESPINHO.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3. COTA DE INUNDAÇÃO NO TROÇO COSTEIRO CAMINHA-ESPINHO .....</b>	<b>60</b>
<b>4.4. GALGAMENTOS EM OBRAS MARÍTIMAS .....</b>	<b>67</b>
4.4.1. QUEBRAMAR SUL DO PORTINHO DE VILA PRAIA DE ÂNCORA.....	67
4.4.1.1 Caudal médio de galgamento pela formulação de Owen (1980).....	69
4.4.1.2. Caudal médio de galgamento pela Ferramenta de Cálculo NN_OVERTOPPING2 .....	70
4.4.2. ANÁLISE COMPARATIVA DOS DIFERENTES MÉTODOS.....	72
<b>5.CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>80</b>
<b>Anexo A - Ficheiro de saída do software “Tidal Analysis Toolbox’.....</b>	<b>82</b>
<b>Anexo B - Cálculo do regime médio dos níveis de maré através do programa escrito em MatLab, mnivmed.m .....</b>	<b>86</b>
<b>Anexo C - Exemplo de introdução de dados utilizada na folha de cálculo utilizada para estimar o caudal médio de galgamento através da formulação empírica de Owen (1980). .....</b>	<b>90</b>
<b>Anexo D - Ficheiro <i>input</i> utilizado no cálculo do caudal médio de galgamento pela ferramenta NN_OVERTOPPING2. ....</b>	<b>94</b>
.....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Movimentos relativos Sol-Terra-Lua e marés correspondentes [1].....	4
Figura 2 – Mapa meteorológico [2].....	7
Figura 3 – Previsão da maré e maregrama obtido no marégrafo de Viana do Castelo em Dezembro de 1978 (Taborda <i>et al.</i> , 1992).....	9
Figura 4 – Regime médio dos Níveis de Maré (Viegas, 2005).....	10
Figura 5 – Número de horas por ano em que um dado nível é excedido (Viegas, 2005).....	11
Figura 6 – Determinação do regime médio dos níveis de maré.....	12
Figura 7 – Regime de extremos dos níveis de maré (Viegas, 2005).....	13
Figura 8 – Determinação do regime de extremos dos níveis de maré.....	14
Figura 9 – Relação entre a altura de onda significativa e o período de pico (Viegas, 2005).....	18
Figura 10 – Relação entre o período médio e o período de pico (Viegas, 2005).....	18
Figura 11 – <i>Wave run-up</i> composto pelo <i>wave set-up</i> e espraçamento da onda (adaptado de Ruggiero <i>et al.</i> , 1997).....	19
Figura 12 – Formulação de Van der Meer e Janssen (1995) para o cálculo do <i>run-up</i> (adaptado de AILPE, 2000).....	20
Figura 13 – Processamento dos dados no <i>Global Mapper</i> v16.1.....	21
Figura 14 – Perfil transversal do terreno usando o <i>Global Mapper</i> v16.1.....	22
Figura 15 – Variáveis intervenientes no cálculo do caudal de galgamento em quebra-mares de taludes impermeáveis (Lopes, 2005).....	26
Figura 16 – Variáveis a considerar num talude permeável (Lopes, 2005).....	28
Figura 17 – Definição de um quebra-mar com defletor (Lopes, 2005).....	29
Figura 18 – Ábaco para determinação do coeficiente de galgamento $D_f$ para quebra-mares impermeáveis (adaptado de Owen e Steele, 1991).....	31
Figura 19 – Ábaco para determinação do coeficiente de galgamento $D_f$ para quebra-mares permeáveis (adaptado de Owen e Steele, 1991).....	32
Figura 20 – Definição de variáveis num paramento vertical (Lopes, 2005).....	33
Figura 21 – Esquema de grandes taludes a barlamar do paramento vertical (Lopes, 2005).....	34
Figura 22 – Esquema de taludes emergentes com o coroamento acima do nível médio da água (Lopes, 2005).....	34
Figura 23 – Parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2 [3].....	36
Figura 24 – Planta de enquadramento do troço costeiro Caminha – Espinho (APA, 2015).....	39
Figura 25 – Avanço da urbanização entre Aver-o-mar e Póvoa de Varzim (Cardoso, 2005).....	40
Figura 26 – Acumulação sedimentar provocada por estruturas de defesa costeira (adaptado de Coelho, 2005).....	41
Figura 27 – Variação da linha de costa em Paramos entre 1998-2003 (à esquerda) e em Arcozelo entre 1993-2003 (à direita) [adaptado de Basto, 2009].....	42
Figura 28 – Previsão da posição da linha de costa na Aguda (à esquerda) e em Paramos (à direita) [adaptado de Basto, 2005].....	43
Figura 29 – Repartição do investimento total realizado até ao final de 2005 por tipologia de intervenção (adaptado de Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2013).....	44
Figura 30 – Valores atingidos pela altura significativa no temporal do inverno de 2014 (APA, 2014).....	45
Figura 31 – Picos de altura da agitação marítima (APA, 2014).....	46
Figura 32 – Erosão dunar em Moledo à esquerda [4] e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	47

Figura 33 – Destruição de passadiços e erosão das dunas em Viana do Castelo à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	47
Figura 34 – Destruição de passadiços e galgamentos em Esposende à esquerda [5] e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	48
Figura 35 – Galgamentos para a via pública na Póvoa de Varzim à esquerda [6] e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	49
Figura 36 – Destruição da proteção longitudinal aderente em Mindelo à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	49
Figura 37 – Destruição de passadiços e galgamentos em Angeiras à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	50
Figura 38 – Destruição de passadiços e galgamentos no troço Aguda – São Félix da Marinha à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	51
Figura 39 – Galgamentos e destruição de passadiços em Paramos à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015).....	51
Figura 40 – Falhas nos registos dos dados de maré em Leixões entre 2003 e 2013.....	54
Figura 41 – a) Registos no marégrafo; b) Maré astronómica (após reconstituição); c) Sobrelevação meteorológica.....	56
Figura 42 – Níveis de maré relativos ao regime médio.....	57
Figura 43 – Número de horas por ano em que a cota $S_{NM}$ é excedida.....	58
Figura 44 – Níveis de maré relativos ao regime de extremos.....	59
Figura 45 – Zona de aplicação da metodologia e sua orientação (Viegas, 2005).....	60
Figura 46 – Dados de agitação marítima ao largo (Viegas, 2005).....	61
Figura 47 – Dados de agitação marítima junto à praia (Viegas, 2005).....	61
Figura 48 – Regime médio da cota de inundação numa praia dissipativa (Viegas, 2005).....	62
Figura 49 – Regime médio da cota de inundação numa praia refletiva (Viegas, 2005).....	62
Figura 50 – Regime de extremos da cota de inundação numa praia dissipativa (Viegas, 2005).....	63
Figura 51 – Enquadramento da “ÁREA – III, Subzona – a” (adaptado de AILPE, 2000).....	63
Figura 52 – Regime de extremos de cota de inundação para a “ÁREA III, Subzona – a” (adaptado de AILPE, 2000).....	64
Figura 53 – Avenida dos Banhos no município da Póvoa de Varzim (Google Earth, 2015).....	65
Figura 54 – Perfil transversal da Praia Azul obtido pelo <i>Global Mapper</i> v16.1.....	65
Figura 55 – Perfil transversal do passeio marítimo obtido pelo <i>Global Mapper</i> v16.1.....	66
Figura 56 – Enquadramento do quebramar sul do portinho de pesca de Vila Praia de Âncora (Google Earth, 2015).....	68
Figura 57 – Galgamento do quebramar no temporal do inverno de 2014 [7].....	68
Figura 58 – Perfil transversal do quebramar sul do portinho de Vila Praia de Âncora (Teixeira, 2012).....	69
Figura 59 – Caudais médios de galgamento correspondentes aos quantis de ordem 5% e 95% pela ferramenta de cálculo neuronal NN_OVERTOPPING2.....	72

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Principais constituintes harmónicas da maré astronómica para o Porto de Leixões (Instituto Hidrográfico, 2005).....	8
Quadro 2 – Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança de estruturas marítimas (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007).....	24
Quadro 3 – Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança de pessoas (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007).....	24
Quadro 4 – Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança de veículos (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007).....	24
Quadro 5 – Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança barcos, edifícios e equipamentos localizados na zona abrigada pela estrutura (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007).....	25
Quadro 6 – Coeficientes empíricos A e B para quebra-mares de taludes (adaptado de Owen, 1980).....	26
Quadro 7 – Coeficientes empíricos A e B para quebra-mares com berma a uma cota ao nível médio da água (adaptado de Owen, 1980).....	27
Quadro 8 – Coeficientes de Rugosidade (adaptado de Owen, 1980).....	28
Quadro 9 – Fatores de ajuste do coeficiente de reflexão para quebra-mares impermeáveis ( $Wh/Ac/0.6$ ) (adaptado de Owen e Steele, 1991).....	30
Quadro 10 – Fatores de ajuste do coeficiente de reflexão para quebra-mares impermeáveis ( $Wh/Ac < 0.6$ ) (adaptado de Owen e Steele, 1991).....	30
Quadro 11 – Intervalos de valores de entrada admitidos no uso da ferramenta NN_OVERTOPPING2 referentes a uma altura de onda significativa de $H_{m0}=1m$ (adaptado de CLASH, 2005).....	37
Quadro 12 – Coordenadas geográficas do marégrafo de Leixões (adaptado de Instituto Hidrográfico, 2005).....	53
Quadro 13 – Constantes harmónicas das principais constituintes da maré astronómica para o Porto de Leixões determinadas através de registos entre 2003 e 2013 pelo <i>software Tidal Analysis Toolbox</i> .....	54
Quadro 14 – Constantes harmónicas das principais constituintes da maré astronómica para o Porto de Leixões (Instituto Hidrográfico, 2005).....	55
Quadro 15 – Máximos anuais da série de 11 anos de Níveis de Maré.....	58
Quadro 16 – Cálculo do regime de extremos dos níveis de maré.....	59
Quadro 17 – Características do quebra-mar sul do Portinho de Vila Praia de Âncora (adaptado de Teixeira, 2012).....	69
Quadro 18 – Cálculo do caudal médio de galgamento segundo Owen (1980).....	70
Quadro 19 – Cálculo do caudal médio de galgamento pelo NN_OVERTOPPING2.....	71





## NOMENCLATURA

### SÍMBOLOS

$a_0$	nível médio
$A_c^*$	altura livre adimensional
$A_f$	fator de ajuste
$a_i$	amplitude da componente $i$
CI	cota de inundação
$C_r$	coeficiente de redução
$C_w$	largura do coroamento
$D_f$	razão entre o caudal médio de galgamento com e sem o defletor
$G$	constante de gravitação universal
$F$	parâmetro definidor da separação entre o regime médio e o de extremos
$g$	aceleração da gravidade
$h$	profundidade de água na base da estrutura
$H$	altura da onda a qualquer profundidade
$H_0$	altura da onda em águas profundas
$H_{rms}$	altura quadrática média junto à praia
$H_s$	altura de onda significativa na base do talude
$K_S$	coeficiente de empolamento
$S_{NM}$	nível de maré observado
$L_{Ru}$	escala vertical da função de distribuição
$P$	probabilidade de excedência
$N$	número de componentes harmónicos
$Q$	caudal médio de galgamento por metro de quebramar
$Q^*$	caudal adimensional
$Q_b^*$	caudal adimensional que atinge a base do defletor
$Q_b$	caudal médio de galgamento que atinge a base do defletor por metro de quebramar
$r$	coeficiente de rugosidade
$R^*$	altura livre adimensional
$R_c$	altura livre do quebramar
$R_u$	espraçamento ou run-up
$R_{u0}$	<i>run-up</i> considerando um talude infinito
$R_{100}$	nível máximo ultrapassado por 100% das ondas

$S_{MA}$	maré astronómica reconstituída
$S_{SM}$	sobrelevação meteorológica
$T_M$	período de retorno
$T_m$	período de onda na base do talude
$T_p$	período de pico
$T_z$	período médio
$X^*$	altura livre adimensional do talude
$x_0$	moda
$x_{random}$	número aleatório
$W^*$	altura adimensional do defletor
$W_h$	altura do defletor
$\omega_i$	frequência da componente $i$
$\varphi_i$	fase da componente $i$
$\mu$	média
$\sigma$	desvio padrão
$\gamma$	constante de <i>Euler</i>
$\xi$	parâmetro de similiaridade da zona de rebentação ou número de <i>Iribarren</i>
$\beta$	declive da praia
$\lambda_e$	parâmetro de localização do regime de extremos
$\lambda_m$	parâmetro de localização do regime médio
$\delta_e$	parâmetro de escala do regime de extremos
$\delta_m$	parâmetro de escala do regime médio
$\gamma_b$	parâmetro que relaciona a inclinação dos alinhamentos
$\gamma_f$	parâmetro de considera a rugosidade do terreno
$\gamma_w$	parâmetro que considera a percolação

## ACRÓNIMOS

AILPE	<i>Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español</i>
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ARMA	<i>Auto Regressive Moving Average</i>
CERC	<i>The Coastal Engineering Research Center</i>
CH	Constantes Harmónicas
CLASH	<i>Crest Level Assesment of Coastal Structures</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
NMGM	Nível Médio Global do Mar
POOC	Plano de Ordenamento da Orla Costeira
SHOM	<i>Service Hydrographique et Océanographique de la Marine</i>
UOPG	Unidades Operativas de Planeamento e Gestão
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

O litoral representa uma importante faixa do território português devido tanto aos valores naturais e paisagísticos como também ao facto de nele se encontrar três quartos da população portuguesa e de contribuir para 85% do Produto Interno Bruto Nacional (APA, 2012).

No entanto, o crescimento acelerado que estas áreas sofreram nas últimas décadas, além do desenvolvimento socioeconómico, provocou sérios problemas de ordenamento do território para os quais nem sempre houve uma resposta adequada.

De modo a atuar na prevenção de danos em infraestruturas junto à zona costeira e na proteção dessa mesma zona, têm vindo a ser realizadas várias intervenções de engenharia como a construção de proteções, soluções de alimentação artificial de praias e reabilitação de dunas.

Contudo, a implementação destas medidas não resolve a título definitivo os problemas resultantes da incidência da agitação marítima. Assim sendo, é fundamental conhecer os fenómenos intervenientes, bem como possuir instrumentos de planeamento e gestão da zona costeira que permitam efetuar uma avaliação dos riscos associados à agitação marítima. A adoção de uma estratégia baseada nestes princípios permitirá uma melhoria dos sistemas de previsão, aviso e socorro às populações, e por isso uma diminuição dos danos materiais e humanos.

Uma vez conhecidos os galgamentos (através de formulações empíricas e ferramentas de cálculo) e as cotas máximas de inundação, a avaliação do risco passa pela determinação da probabilidade de ocorrência desses eventos acima de determinados limiares predefinidos, assim como pela avaliação das consequências dessas ocorrências.

No presente trabalho adotou-se a metodologia usada na costa espanhola, e que consta do *Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español* (AILPE, 2000), ao caso de estudo (troço costeiro Caminha-Espinho), para avaliar a sua vulnerabilidade a fenómenos de galgamento e inundações.

A adoção da metodologia mencionada permite avaliar com alguma precisão a dinâmica dos sistemas costeiros, e permite também que, de uma forma mais expedita, se possam determinar os níveis de maré e estimar as cotas de inundação numa determinada zona do litoral.

## 1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O troço costeiro compreendido entre Caminha e Espinho estende-se ao longo de 110km, tratando-se de uma faixa litoral que tem registado algumas situações preocupantes relacionadas com galgamentos e inundações.

Apesar de se tratar de uma zona bastante heterogénea quanto ao tipo de estruturas de defesa costeira e do tipo de praias pretende-se, com este trabalho, aplicar uma metodologia já adotada na costa espanhola que permitirá compreender muitos dos fenómenos envolvidos como a maré (componente astronómica), a sobrelevação meteorológica e o *run-up* em praias.

Pela análise dos níveis de maré (alturas horárias) registados no Porto de Leixões entre 2003 e 2013 e, com recurso a um programa escrito em *MatLab* que permite a realização de uma análise harmónica, *Tidal Analysis Toolbox*, é possível obter os valores previstos de maré para o mesmo período em estudo. A sobrelevação meteorológica resultará da diferença entre os valores observados e os previstos. Para o estudo da cota e/ou distância alcançada pelo *wave run-up* será utilizada a formulação de *Van der Meer e Janssen* (1995), tal como consta do documento usado na costa espanhola.

O estudo dos galgamentos em estruturas marítimas é também um ponto crucial desta dissertação em que serão comparados os resultados obtidos através de formulações empíricas com resultados obtidos através de uma ferramenta de cálculo com base em redes neuronais, *NN\_OVERTOPPING2*. Esta análise incidirá sobre uma das situações críticas do temporal do inverno de 2014 em que houve registos de galgamentos e inundações.

## 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

No primeiro e (atual) capítulo encontra-se uma breve introdução do tema da dissertação referindo-se o enquadramento do trabalho e os principais objetivos do mesmo.

No segundo capítulo que, por sua vez, está dividido em três subcapítulos, são apresentados os conceitos necessários à perceção do tema em análise. Desta forma, são clarificados conceitos relacionados com a maré astronómica, sobrelevação meteorológica, *run-up*, previsão de marés, galgamentos em estruturas marítimas através de formulações empíricas para diferentes tipos de estruturas e é também mencionado o funcionamento da ferramenta de cálculo *NN\_OVERTOPPING2*.

O terceiro capítulo é dedicado à caracterização do caso de estudo (troço costeiro Caminha-Espinho), ou seja, pretendeu-se analisar a sua dinâmica e evolução e a legislação aplicada (POOC Caminha-Espinho). É também feita uma análise das situações mais gravosas que surgiram na sequência do temporal do inverno de 2014.

Ao longo do capítulo 4 são aplicadas ao caso de estudo a metodologia descrita no AILPE e as duas metodologias para a determinação do caudal de galgamento, sendo feita a respetiva análise de resultados.

Por fim, o último capítulo diz respeito às conclusões gerais acerca do trabalho realizado e às recomendações para trabalhos futuros.

# 2

## NÍVEIS DE INUNDAÇÃO EM ZONAS COSTEIRAS

### 2.1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, são muito frequentes inundações em algumas zonas costeiras, mais vulneráveis à subida do nível do mar. Estas inundações ocorrem, frequentemente, durante temporais marítimos e/ou em períodos de marés vivas. O regime de inundação alcançado numa zona costeira por ação da dinâmica marítima e meteorológica é um fenómeno complexo, tanto pelo grande número de fatores que intervêm no processo, como pela interação entre os mesmos.

O nível de água em zonas costeiras é fundamentalmente ditado pela maré (componente astronómica), pela sobrelevação (de origem meteorológica) e pela agitação marítima (espraiamento).

Apesar de, níveis de água elevados poderem também ocorrer devido a precipitações e caudais intensos (como por exemplo, na foz do rio Douro), importa aqui caracterizar os fenómenos físicos responsáveis pela ocorrência de níveis extremos em zonas costeiras, excluindo-se, neste trabalho, a subida do nível de água de carácter hidrológico, isto é, associado a precipitações e caudais fluviais extremos que afetam, em particular, as zonas costeiras ribeirinhas.

### 2.2. NÍVEIS DE INUNDAÇÃO EM ZONAS COSTEIRAS

#### 2.2.1. MARÉ ASTRONÓMICA

Na costa portuguesa as marés possuem amplitudes que podem atingir os 4m, sendo a maré do tipo semi-diurna uma vez que ao longo de um dia existem duas baixa-mares e duas preia-mares. A componente astronómica é a mais importante e é a que serve de base ao cálculo das previsões presentes nas Tabelas de Marés.

A oscilação da maré é consequência da Lei da Gravitação Universal (Terceira Lei de *Newton*) segundo a qual os corpos se atraem na razão direta das suas massas e na razão inversa do quadrado da distância que os separa. A Lua, devido à sua proximidade à Terra, é o corpo que mais influencia a maré, seguindo-se o Sol, tendo em conta a sua massa, Figura 1. Apesar da massa do Sol ser 27 milhões de vezes maior que a da Lua, o facto de esta se encontrar mais próxima da Terra faz com que a influência da Lua seja mais do dobro da do Sol, uma vez que a força atrativa é inversamente proporcional ao quadrado da distância.

$$F = G \frac{M_1 M_2}{d^2} \quad (2.1)$$

em que  $F$  representa a força de atração (N),  $G$  a constante de gravitação universal igual a  $6,671011 \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ ,  $M_1$  a massa do corpo 1 (kg),  $M_2$  a massa do corpo 2 (kg) e  $d$  a distância entre os centros dos corpos. A atração gravitacional da Lua faz com que a água dos oceanos avance sobre a parte da terra que se encontra mais próxima da Lua e também sobre a parte diametralmente oposta. O movimento de translação da Lua, também conhecido como dia lunar, tem a duração de 24h e 50 min. Dividindo-se este tempo em quatro períodos, tem-se quatro turnos de aproximadamente 6h e 12min, que é a duração de cada maré e suas variações, da preia-mar à baixa-mar.

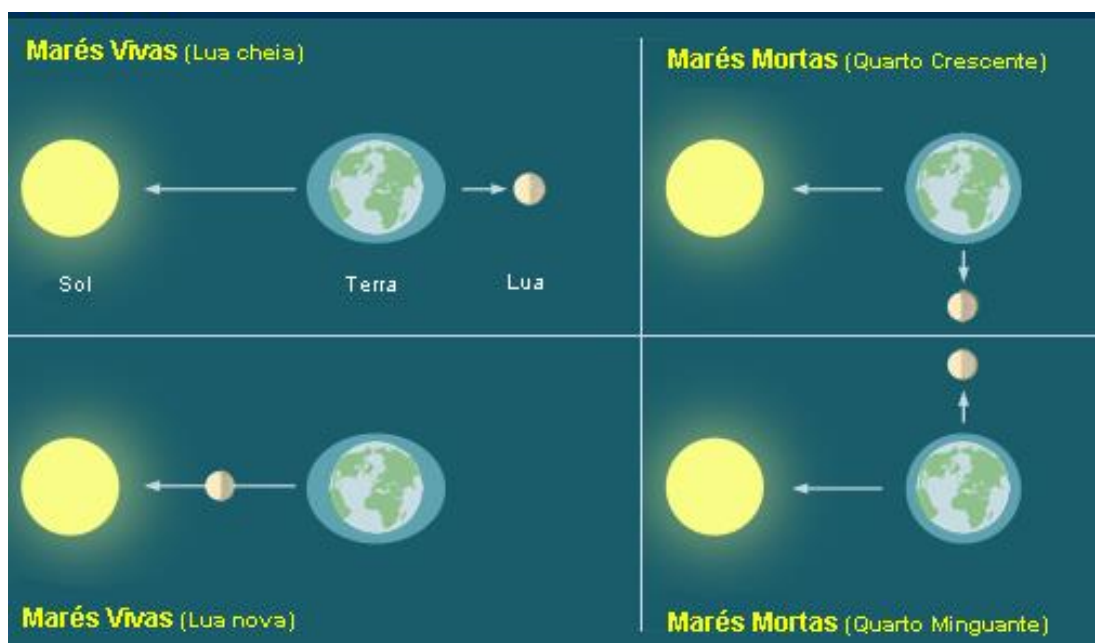


Figura 1 – Movimentos relativos Sol-Terra-Lua e marés correspondentes [1]

Os movimentos relativos Sol-Terra-Lua fazem com que as marés sejam movimentos harmónicos compostos que podem, consequentemente, ser decompostos em vários movimentos harmónicos simples, expressos por equações matemáticas. Em geral, medições maregráficas num dado local permitem obter as componentes harmónicas da maré, que estão correlacionadas com as atrações planetárias e o movimento de rotação da Terra.

#### 2.2.2. SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA

A sobrelevação meteorológica é a diferença entre os valores reais da elevação da superfície livre observados nos maregrafos e os devidos apenas à maré astronómica. Note-se que as previsões dos níveis de maré presentes nas Tabelas de Marés contemplam apenas as causas devidas à componente astronómica. Na prática obtêm-se os valores da altura da sobrelevação meteorológica após a aplicação da análise harmónica aos registos de maré disponíveis, realizando-se a reconstituição da maré a partir



das constituintes obtidas pela análise harmónica. A diferença entre o registo observado e a maré reconstituída é a sobrelevação meteorológica, também chamada de resíduo,

$$S_{SM} = S_{NM} - S_{MA} \quad (2.2)$$

em que  $S_{SM}$  representa a sobrelevação de origem meteorológica,  $S_{NM}$  o nível do mar observado, e  $S_{MA}$  a maré reconstituída.

As marés meteorológicas resultam da interação ar-água, isto é, as massas de água são forçadas pela atmosfera, que respondem gerando oscilações dos níveis de água com várias frequências e amplitudes. A sobrelevação meteorológica pode ser induzida tanto pelo vento como pelas variações da pressão atmosférica.

A maré meteorológica é facilmente observável em dias de tempestade uma vez que ocorrem amplitudes de maré meteorológica superiores ao normal. Quando se atingem amplitudes da ordem métrica, a sobrelevação do nível do mar pode ser integrada na classe dos acontecimentos catastróficos que podem induzir modificações determinantes na distribuição dos sedimentos da plataforma continental. Quando esta sobrelevação ocorre associada a grandes temporais e em períodos de marés vivas aumentam consideravelmente os riscos de inundação e a probabilidade de danificação ou destruição de bens (Almeida, 2008).

A altura significativa da onda e a sobrelevação estão ambas ligadas às condições meteorológicas. Desta forma, em períodos de temporal é de esperar que a altura das ondas seja superior ao habitual. Nesses períodos, a sobrelevação registada nos marégrafos é também superior, em parte devido à descida da pressão atmosférica e ao efeito do vento mas também devido à sobrelevação associada à rebentação das ondas. Acresce ainda o facto de que, na existência de maior agitação, a filtragem efetuada pelo poço do marégrafo torna-se menos eficiente, dando origem a um resíduo (diferença entre o nível previsto e o nível efetivamente medido pelo marégrafo) maior. Em períodos de bom tempo, em que se registam aumentos da pressão atmosférica, acontece o fenómeno inverso, e o resíduo toma valores menores, ou mesmo negativos sendo que neste caso é devido ao nível previsto ser superior ao nível medido (Almeida, 2008).

#### 2.2.2.1. Influência do Vento

A ação do vento no nível do mar é muito variável e depende substancialmente da fisiografia da área em questão. De um modo geral pode-se afirmar que, quando o vento atua na direção mar-terra induz uma elevação do nível do mar e, consequentemente, alturas de água superiores às previstas; o fenómeno inverso ocorre quando o vento atua na direção terra-mar. A variação do nível de água deve-se à existência de um gradiente entre o nível de água alterado (onde se verificam os efeitos do vento) e o nível de água inicial (sem efeitos do vento). Ou seja, a influência do vento só tem repercussões em águas pouco profundas, onde a massa de água se encontra confinada por terra. Assim, torna-se claro que o vento não tem qualquer influência no nível de água ao largo.

A maximização da maré meteorológica ocorre quando a direção do vento é paralela à costa. Quando o vento atua com intensidade e duração suficientes para criar a acumulação de água junto à costa devido ao transporte de água são observados valores de maré mais elevados do que os previstos nas Tabelas de Marés e assim resulta uma maré meteorológica positiva. A maré meteorológica negativa ocorre

quando o transporte de água é feito em direção ao largo o que provocará níveis de água mais baixos que os previstos nas Tabelas de Marés.

São vários os fatores que podem justificar a diferença entre os níveis de maré previstos e os níveis de água registados, entre os quais se podem destacar a conjugação dos efeitos meteorológicos e a diferença entre o nível médio do mar real e o nível médio adotado e utilizado na previsão. Em Portugal, estas diferenças ultrapassam, geralmente, os 10cm.

Assim sendo, a amplitude de sobrelevação do nível do mar não pode ser, de modo nenhum, desprezada, devendo ser tida em conta aquando de uma previsão de níveis de extremos uma vez que parte dos prejuízos ocorridos no decurso de vários temporais deve-se às sobrelevações verificadas. Desta forma, face à relevância do assunto, nomeadamente para a correta gestão do litoral, é importante o estudo sistemático de séries temporais alargadas com vista a uma caracterização mais completa da sobrelevação do nível do mar, de origem meteorológica, na costa portuguesa.

#### 2.2.2.2. Influência das Pressões Atmosféricas

A pressão atmosférica é apenas o resultado do peso do ar ( $\gamma = 12.93 \text{ N/m}^3$ ). Em condições normais o peso da camada de ar que envolve a Terra é, ao nível do mar, igual ao peso de uma coluna de mercúrio (Hg) com a altura de 0.76 m, pelo que a pressão atmosférica normal a esse nível é de 760 mm-Hg, que corresponde a 1013 mb (milibares). Baixas pressões tendem a fazer subir o nível do mar, enquanto as altas pressões têm um efeito contrário. Quando a pressão atmosférica é inferior a este valor, o nível do mar aumenta uma vez que existe menos pressão sobre a sua superfície. Quando a pressão ultrapassa os 0.76 m de mercúrio, o nível do mar diminui, atingindo valores mais baixos do que o previsto nas Tabelas de Marés.

Convém notar que o nível da água não se ajusta imediatamente às variações da pressão atmosférica, respondendo, na realidade, à variação da pressão média numa área considerável em torno do ponto em causa. De um modo aproximado, a uma variação de pressão de 10 hectopascal (milibares) corresponde uma variação do nível das águas de 0.09m. Estas diferenças nas alturas de água raramente ultrapassam valores de 0.3 a 0.4m, mas convém ter-se em atenção que elas podem-se sobrepor aos efeitos de outros fenómenos. A maioria das tempestades está associada a baixas pressões que aumentam o nível de água do mar, ou seja, as baixas pressões, por si só, aumentam sempre o nível do mar, mas quando associadas a ventos podem diminuir os níveis de água.

A distribuição das pressões espacial e temporalmente pode ser facilmente interpretada pelos mapas meteorológicos, Figura 2, onde estão representadas linhas que unem todos os pontos em que a pressão é constante, designadas por linhas isobáricas.

A variação da pressão atmosférica por unidade de distância, quando medida perpendicularmente às linhas isobáricas, designa-se por gradiente horizontal de pressão. Quando as isobáricas se encontram muito próximas significa que o gradiente de pressão horizontal é maior e que a variação de pressão ocorre de forma muito rápida para uma distância relativamente curta.

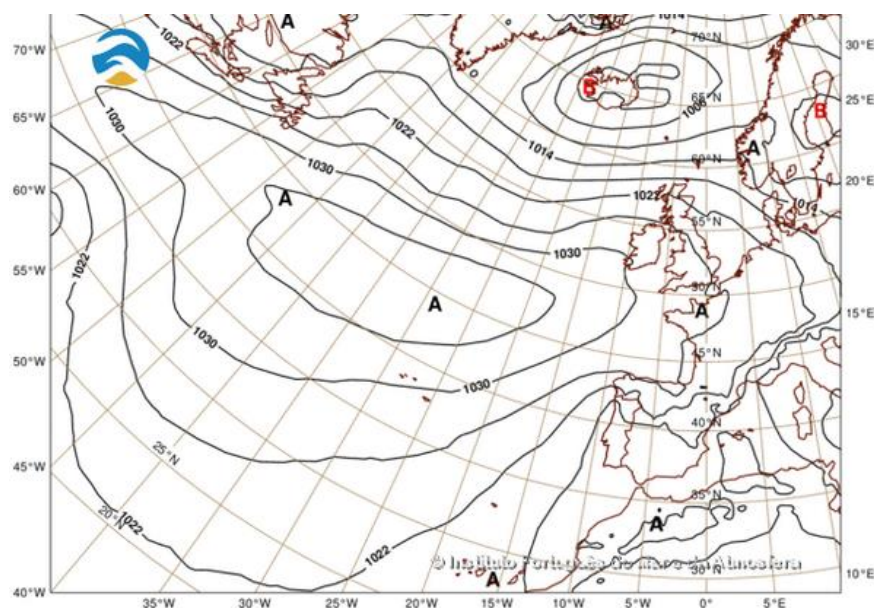


Figura 2 – Mapa meteorológico [2]

### 2.2.3. PREVISÃO DE MARÉS

Cada maré é definida por uma série de parâmetros caracterizadores, as constantes não harmónicas, que variam de local para local. Para tal é necessário definir previamente as constantes harmónicas influenciadoras da maré através da realização de uma análise harmónica, ou seja, através da definição para cada local, da amplitude e da fase de cada constituinte de maré. A determinação destas constantes harmónicas é fundamental uma vez que, como são específicas para cada porto, permitem uma melhor caracterização da maré num dado local. Convém notar que devem estar permanentemente atualizadas para que fenómenos como a erosão, assoreamentos e obras portuárias não interfiram na qualidade das previsões (Instituto Hidrográfico, 2005).

A base da análise harmónica é a consideração de que as variações de maré podem ser representadas por um número finito de termos harmónicos. São utilizadas alturas horárias que devem apenas prever as alterações nos níveis de água provocados por efeitos astronómicos. Daí a necessidade de uma correta “filtragem” dos dados de modo a não existirem interferências de outros efeitos como a agitação marítima. Devem ser utilizadas séries temporais relativamente longas para uma boa análise harmónica uma vez que, deste modo, se minimizam os efeitos meteorológicos ou outros ruídos, como por exemplo passagem ou atracagem de embarcações nas proximidades do marégrafo.

O método de análise harmónica utilizado atualmente em Portugal (no Instituto Hidrográfico) foi desenvolvido no *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine* (SHOM). O processo passa por uma “filtragem” inicial das alturas horárias, transformando-as em alturas reduzidas ao meio-dia, de forma a serem diminuídos os resíduos entre o resultado da análise harmónica e as alturas de maré real (Simon, 1974).

Concluída esta fase, o valor das constantes harmónicas será aquele que minimiza o somatório dos mínimos quadrados dos resíduos, ou seja, que minimiza as diferenças entre as alturas de água observadas e produzidas pelo somatório das ondas possíveis.

Assim, a estimativa do nível da maré astronómica é um processo determinista e pode ser obtido utilizando a seguinte fórmula harmónica, considerando  $N$  componentes harmónicos,

$$S_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2.3)$$

em que  $S_{MA}$  é o nível de maré reconstituído a partir das constituintes encontradas,  $a_0$  o nível médio no local,  $a_i$  a amplitude da componente  $i$ ,  $\omega_i$  a frequência da componente  $i$  e  $\varphi_i$  a fase da componente  $i$ . O valor de referência para o nível médio adotado no Porto de Leixões é de +2.00m ZH.

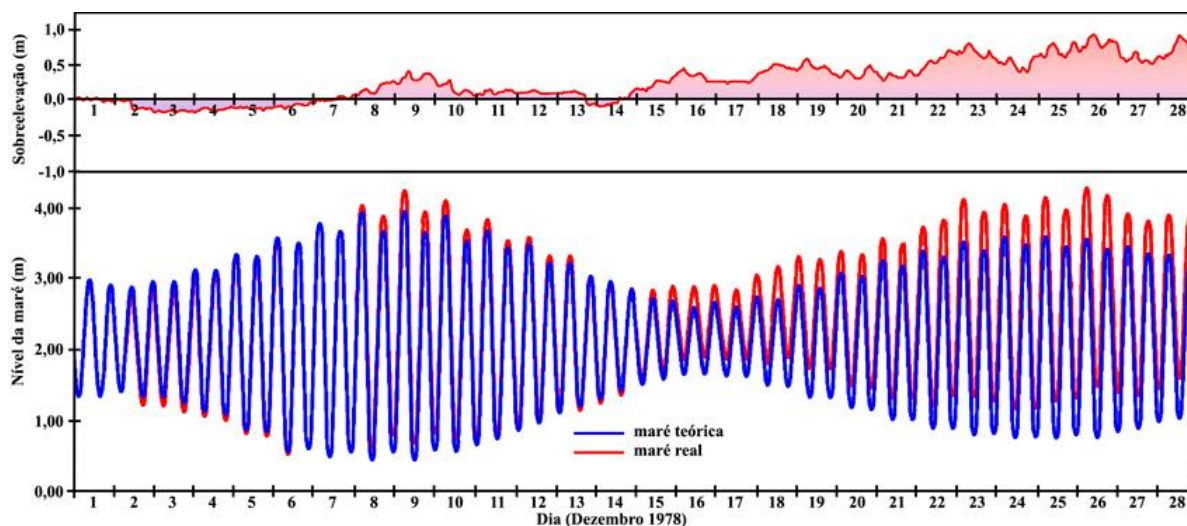
O Quadro 1 apresenta as constantes harmónicas das 5 principais constituintes da maré astronómica e as suas características para o Porto de Leixões e que permitem determinar, posteriormente, os parâmetros não harmónicos (como por exemplo, tipo de maré, unidade de altura ou o estabelecimento de porto).

A análise harmónica para determinação das constantes harmónicas apresentadas no Quadro 1 foi efetuada a partir de um ano de observações maregráficas de 31 de Dezembro de 2002 a 30 de Dezembro de 2003 (Instituto Hidrográfico, 2005).

Quadro 1 – Principais constituintes harmónicas da maré astronómica para o Porto de Leixões (Instituto Hidrográfico, 2005)

NOME	SÍMBOLO	AMPLITUDE H [m]	FASE G [°]	VELOCIDADE [°/h]	DESCRIÇÃO
Onda principal lunar semi- diurna	M <sub>2</sub>	1.054	74.2	28.984	Representa a maré que seria produzida por uma lua fictícia que descrevesse em movimento uniforme uma órbita circular situada no plano do equador celeste (lua média).
Onda principal solar semi- diurna	S <sub>2</sub>	0.365	102.5	30.000	Representa a maré que seria produzida por um sol fictício que descrevesse em movimento uniforme uma órbita circular situada no plano do equador celeste (sol médio).
Onda semi- diurna declinacional luni-solar	K <sub>2</sub>	0.104	100.3	30.082	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol. Também designada por sideral semi-diurna.
Onda diurna declinacional luni-solar	K <sub>1</sub>	0.070	59.3	15.041	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol. Também designada por sideral diurna.
Onda diurna declinacional lunar	O <sub>1</sub>	0.060	318.0	13.943	Traduz as variações da declinação da Lua.

Neste trabalho, a análise harmónica foi realizada com o auxílio do *software* “*Tidal Analysis Toolbox*” (Pawlowicz *et al.*, 2011). O resultado obtido pode ser exemplificado na Figura 3, onde foi utilizado o mesmo método mas que é relativo ao temporal registado entre Fevereiro e Março de 1978 em Viana do Castelo (Taborda *et al.*, 1992).



.Figura 3 - Previsão da maré e maregrama obtido no marégrafo de Viana do Castelo em Dezembro de 1978 (Taborda *et al.*, 1992)

A sobrelevação meteorológica resultante (gráfico superior) é quase sempre positiva (ou seja, representa uma sobrelevação efetiva). Ocorrem valores negativos que correspondem a abaixamentos do nível do mar, em relação ao previsto pela maré, possivelmente devido a fortes sistemas de altas pressões atmosféricas ou a ventos intensos, soprando em direções específicas.

Na costa oeste a altura significativa da ondulação ultrapassou os 5.0 m durante o período de 22 de Fevereiro a 1 Março, chegando mesmo a atingir valores entre 8 e 10 m. Na costa sul a altura de onda significativa, durante o mesmo período, ultrapassou os 3.5 m, chegando a atingir os 6.1 m.

Este temporal provocou avultados prejuízos no litoral que consistiram, essencialmente, em destruições em obras de proteção costeira e em estruturas portuárias com recuos muito rápidos da linha de costa e, principalmente, em numerosos galgamentos oceânicos que provocaram cortes em estradas, inundações em zonas interiores (nomeadamente em zonas urbanizadas), e transporte de grandes quantidades de areia.

#### 2.2.4. NÍVEIS DE MARÉ

Tal como a metodologia seguida no AILPE, define-se neste trabalho nível de maré como o nível do mar sem considerar o efeito da agitação marítima, ou seja, é devido apenas à soma da maré com a sobrelevação de origem meteorológica. Com base na série de dados de níveis de maré disponíveis do marégrafo de Leixões, são calculados o regime médio e o regime de extremos.

No cálculo do regime médio e do regime de extremos dos níveis de maré utilizaram-se dois métodos diferentes. No regime médio fez-se um ajuste da sobrelevação meteorológica a um processo Auto Regressivo de Média Móvel (*Auto Regressive Moving Average*, ARMA). Para o regime de extremos, utilizou-se um ajuste dos máximos anuais a uma Função de Distribuição de Extremos (neste caso de Tipo I ou de *Gumbel*).

#### 2.2.4.1. Regime Médio dos Níveis de Maré

Após a realização da análise harmónica, calculou-se o resíduo (sobrelevação meteorológica) e ajustou-se este a um processo Auto Regressivo de Média Móvel (ARMA).

Segundo Box e Jenkins (1973), os modelos ARMA são ferramentas estatísticas utilizadas no tratamento das séries temporais. Dada uma série temporal,  $X_t$ , o modelo ARMA permite prever o comportamento futuro da série. O modelo ARMA é composto por duas partes, uma auto regressiva (AR – *auto regressive*) e outra correspondente à média móvel (MA – *moving average*). É habitualmente designado por ARMA ( $p, q$ ), onde  $p$  é a ordem da parte auto regressiva e  $q$  a ordem da parte média móvel.

A sobrelevação meteorológica (recriada com base no processo ARMA com recurso a uma função *MatLab* - *armax.m.*) quando somada com a maré (obtida a partir das constituintes harmónicas, ao longo da duração pretendida da simulação) permite obter o nível de maré final.

O gráfico de probabilidade de ocorrência de um nível de maré superior a um determinado valor foi obtido ordenando a série obtida por simulação, associando a cada nível uma probabilidade  $P_{NM}$ .

$$P_{NM}(i) = \frac{i}{n+1}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

em que  $P_{NM}(i)$  é a probabilidade do acontecimento  $i$ , neste caso um dado nível de maré, e  $n$  é o número total de acontecimentos, ou seja, o número total de níveis obtidos. Desta forma, é possível observar graficamente os resultados obtidos, tal como se verifica na Figura 4, que é relativa aos dados registados no marégrafo de Leixões entre o ano de 1979 e 1986, Viegas (2005).

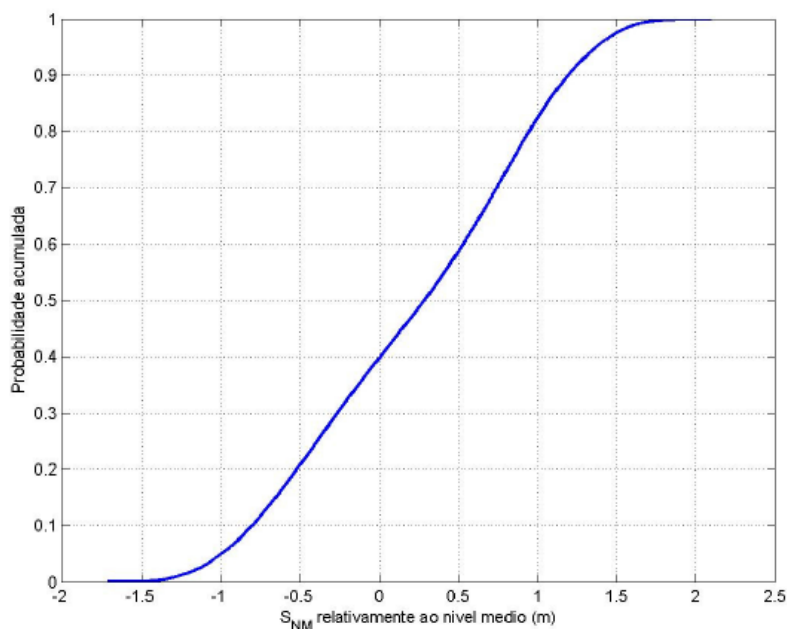


Figura 4 – Regime médio dos Níveis de Maré (Viegas, 2005)

Note-se que os valores de nível de maré apresentados na Figura 4 e 5, são referidos ao nível médio da água do mar (+2.0m acima do zero hidrográfico). Assim, para se obterem os níveis de maré referidos ao zero hidrográfico, é necessário somar este valor a cada nível.

Uma outra forma de visualizar facilmente os resultados é apresentar um gráfico em que seja possível determinar o número de horas por ano em que um dado nível é excedido, Figura 5. Para tal, é necessário multiplicar o número de horas por ano pelo complementar à unidade da probabilidade de excedência de cada nível de maré ( $P_{NM}$ ).

$$N_{horas/ano}(1 - P_{NM}) \quad (2.5)$$

em que  $N_{horas/ano} = 8760$  horas.

Tal como na Figura 4, a Figura 5 também é relativa a dados do marégrafo de Leixões para o mesmo período de tempo (entre o ano de 1979 e 1986).

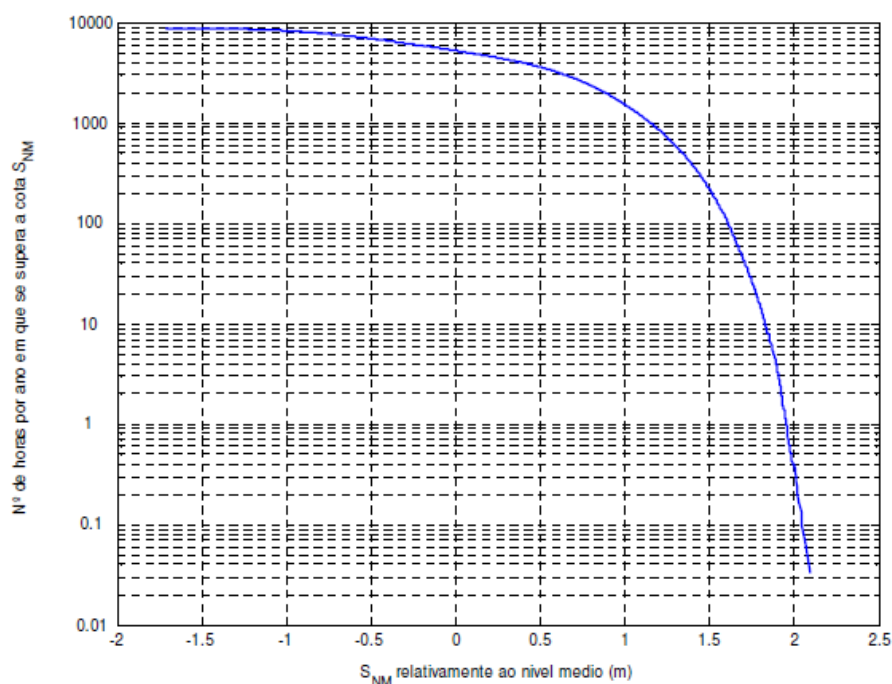


Figura 5 – Número de horas por ano em que um dado nível é excedido (Viegas, 2005)

Para um melhor entendimento do raciocínio adotado observe-se o esquema da Figura 6 relativo ao regime médio.

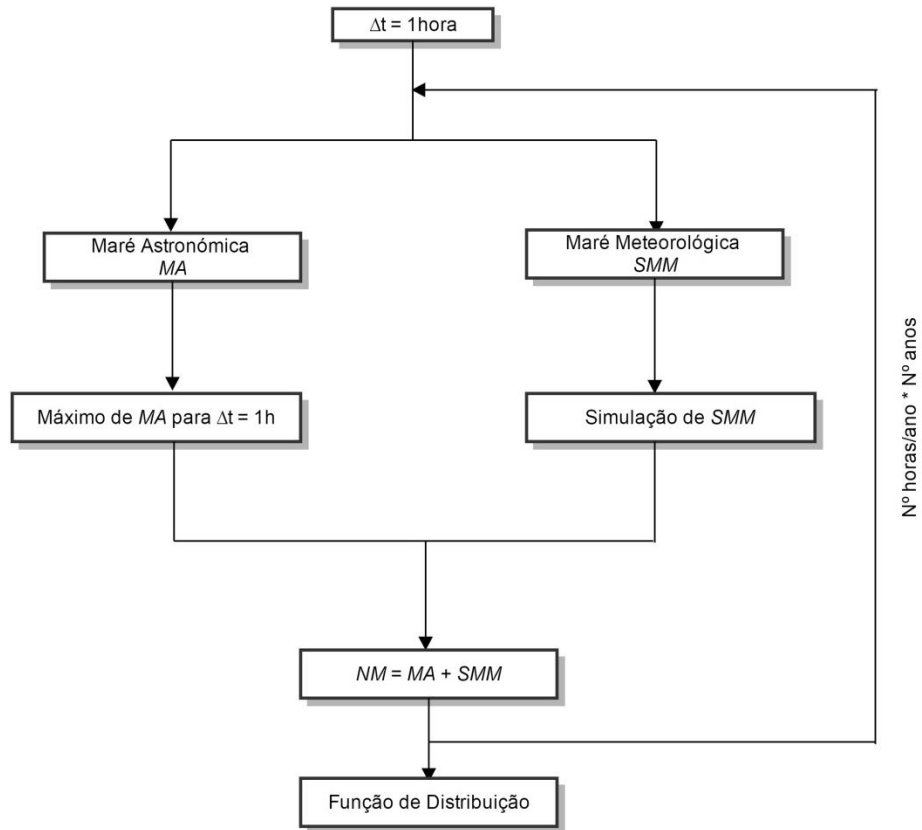


Figura 6 – Determinação do regime médio dos níveis de maré

#### 2.2.4.2. Regime de Extremos dos Níveis de Maré

O regime de extremos é calculado a partir dos máximos anuais da série de dados de níveis de maré disponível, ajustados a uma Função de Distribuição de *Gumbel*. A função de distribuição de probabilidade pode ser definida pela seguinte expressão,

$$F(x) = e^{-e^{-a(x-x_0)}} \quad (2.6)$$

em que  $x$  representa os máximos anuais de níveis de maré e  $x_0$  representa a moda que pode ser determinada pela seguinte expressão,

$$x_0 = \mu - \frac{\gamma}{a} \quad (2.7)$$

em que  $\mu$  representa a média e  $\gamma$  a constante de *Euler* tomando o valor de 0.5772157. O valor de  $a$  está relacionado com desvio padrão da amostra  $\sigma$ , pela seguinte expressão,

$$a = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma} \quad (2.8)$$



Após terem sido realizados alguns procedimentos iniciais, como a ordenação dos valores por ordem decrescente e a determinação do período de retorno é feito o ajuste linear aos valores pelo método dos mínimos quadrados,

$$S_{NM} = AK + B \quad (2.9)$$

A equação anterior pode ainda ser reescrita da seguinte forma,

$$S_{NM} = \sigma K + \overline{S_{NM}} \quad (2.10)$$

em que  $K$  representa o parâmetro que permite a definição da reta e que pode ser determinado pela expressão 2.11. Desta forma, a cada período de retorno pretendido ( $T_M$ ) está associado um determinado valor de  $K$ . Após a definição desta reta será mais fácil a extrapolação dos resultados.

$$K = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} [\gamma + \ln(T_M) - \ln(T_M - 1)] \quad (2.11)$$

Após a determinação da função de distribuição é ainda possível obter um intervalo de confiança de 90%. Este intervalo de confiança é dado da seguinte forma,

$$(\bar{x} - 1.645\hat{s}\sqrt{n/a}, \bar{x} + 1.645\hat{s}\sqrt{n/b}) \quad (2.12)$$

em que  $a$  e  $b$  dependem de  $n$  (tamanho da amostra),  $\bar{x}$  é o estimador da média e  $\hat{s}$  o estimador do desvio padrão. Desta forma é possível obter um gráfico como o da Figura 7. Mais uma vez, a título exemplificativo, são apresentados os resultados associados aos dados registados no marégrafo de Leixões entre 1979 e 1986.

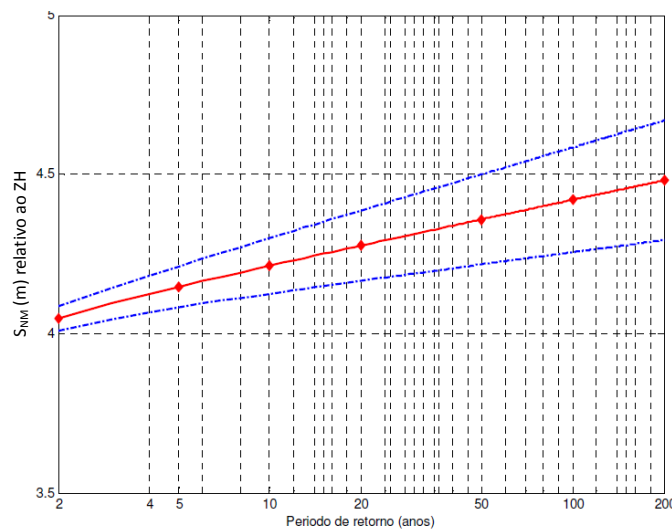


Figura 7 – Regime de extremos dos níveis de maré (Viegas, 2005)

À semelhança do que foi feito para o regime médio, é igualmente apresentado um esquema elucidativo (Figura 8) do raciocínio adotado para a determinação do regime extremo dos níveis de maré.

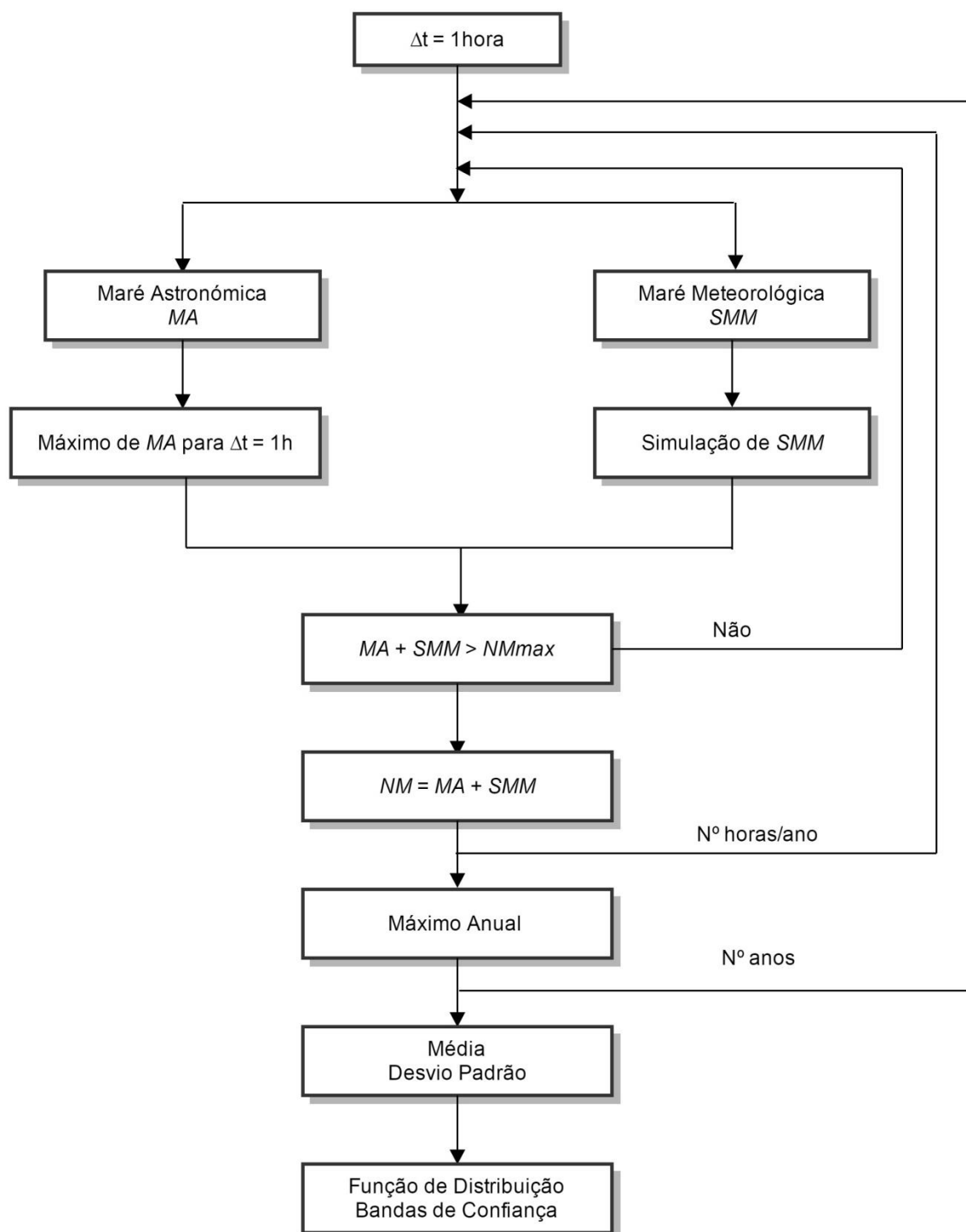


Figura 8 – Determinação do regime de extremos dos níveis de maré

### 2.2.5. AGITAÇÃO MARÍTIMA

A agitação marítima, ou seja, as ondas de superfície no oceano, resultam da atuação de forças desestabilizadoras que atuam no corpo de água considerado, forçando a sua deformação, que tende a recuperar a posição de equilíbrio sob a ação da gravidade e da tensão superficial.

Para gerar ondas é necessário uma ação de algum tipo, como por exemplo uma rajada de vento. Uma vez criada a perturbação, a força gravitacional e a tensão superficial permitem a propagação das ondas.

Os dados relativos à agitação marítima e obtidos pela boia ondógrafo oferecem informação acerca do que se passa na boia. Para se obter o regime de ondulação junto à praia obtém-se, primeiramente, as características da ondulação em água profundas através de retro propagação, calculando os coeficientes de empolamento e de refração na forma apropriada, partindo de uma profundidade inferior conhecida, para águas profundas. A partir dos dados ao largo, faz-se então a propagação dos estados de mar em direção à praia, utilizando o mesmo método, mas em sentido contrário.

Relativamente à representação da agitação marítima convém referir, pelo menos, três dos parâmetros caracterizadores mais utilizados.

A altura de onda significativa  $H_s$  ou  $H_{1/3}$ , é a altura média do terço mais alto das ondas registadas, ou seja, depois de ordenado o registo, considera-se apenas o terço correspondente às ondas mais elevadas e calcula-se a média dessas alturas.

O período médio é também uma variável estatística, representando para cada registo, o período médio de todas as ondas.

Os parâmetros referidos anteriormente (altura de onda significativa e período médio) são determinados no domínio do tempo, mas utilizam-se também parâmetros determinados no domínio da frequência, como é o caso do período de pico,  $T_p$ . O período de pico corresponde ao período das ondas sinusoidais mais energéticas.

É também importante descrever, ainda que sucintamente, as principais transformações que as ondas podem sofrer conforme se deslocam de águas profundas para águas pouco profundas. Essas transformações estão relacionadas com variações de  $H$  (altura da onda),  $L$  (comprimento de onda),  $C$  (velocidade de propagação das ondas individuais) e  $\alpha$  (ângulo que a onda faz com os contornos da batimetria).

Simplificadamente, a transformação das ondas é dividida em refração e difração das ondas. A refração é a variação da direção de propagação da onda, que resulta das alterações na velocidade da onda, provocadas por variações na profundidade da água. Durante a refração, a crista da onda deforma-se de modo a alinhar-se com a batimetria, e a direção de propagação da onda tende a tornar-se perpendicular à costa.

Já a difração resulta da propagação da energia das ondas em diferentes direções, que acontece no caso de haver obstruções à propagação das ondas. Assim, no âmbito deste trabalho, a difração não merece especial atenção uma vez que é pouco significativa em costas “abertas”, em que habitualmente não há obstáculos à propagação das ondas.

O fenómeno de empolamento (*shoaling*) reflete as alterações da onda relacionadas com a variação da profundidade de água, para ondas que se aproximam da costa perpendicularmente à batimetria. Por simplificação, considera-se que a batimetria é paralela à costa. A altura da onda ( $H$ ) a qualquer profundidade pode então ser relacionada com a altura da onda em águas profundas ( $H_0$ ) através do coeficiente de empolamento ( $K_s$ ),

$$K_s = \frac{H}{H_0} \quad (2.13)$$

O coeficiente de empolamento  $K_s$  tende para infinito conforme a profundidade tende para zero; mas o que acontece na realidade é que a declividade da onda ( $H/L$ ) tem um limite físico. Quando esse limite físico é excedido dá-se a rebentação da onda, havendo uma forte diminuição da altura da onda num curto espaço, com forte dissipação de energia. O ponto em que este fenómeno acontece toma o nome de ponto de rebentação.

Em Nielson e Hanslow (1991) é referido o parâmetro de rebentação, ou número de *Iribarren* ( $\xi$ ), como sendo um parâmetro útil na determinação das características da zona de rebentação,

$$\xi = \left( \frac{L_0}{H_0} \right)^{0.5} \tan \beta \quad (2.14)$$

em que  $\tan \beta$  representa o declive da praia.

Após a rebentação da onda, como já foi referido, dá-se a dissipação da energia. Esta dissipação não é feita instantaneamente e a onda continua a avançar sobre a praia durante algum tempo depois de rebentar. Ao maior nível de água atingido pela onda sobre a praia atribui-se a designação de espraçamento ou *run-up*.

#### 2.2.6. COTA DE INUNDAÇÃO

A cota de inundação ( $CI$ ) inclui as contribuições da maré ( $S_{MA}$ ), da sobrelevação meteorológica ( $S_{MM}$ ) e do espraçamento ou *run-up* ( $R_u$ ) causado pela agitação marítima.

$$CI = S_{MA} + S_{SM} + R_u \quad (2.15)$$

Convém referir que o *run-up* é o maior nível de água atingido pela onda, sobre a praia. O cálculo do *run-up*, neste trabalho, baseou-se em *Nielsen e Hanslow* (1991) em que o espraçamento segue uma distribuição de *Rayleigh*,

$$P\{z > R_u\} = \exp \left[ - \left( \frac{R_u - R_{100}}{L_{R_u}} \right)^2 \right] \quad (2.16)$$

em que  $R_u$  representa o limite vertical atingido pelo espraçamento,  $R_{100}$  o nível máximo ultrapassado por 100% das ondas (que corresponde, aproximadamente, ao nível médio em repouso), e  $L_{R_u}$  representa a escala vertical da função de distribuição dada por:

$$\begin{cases} L_{R_u} \approx 0.6 (H_{rms} L_0)^{0.5} \tan \beta, & \tan \beta \geq 0.10 \\ L_{R_u} \approx 0.05 (H_{rms} L_0)^{0.5}, & \tan \beta < 0.10 \end{cases} \quad (2.17)$$

em que  $H_{rms}$  representa a altura média quadrática no pé da praia. A distinção entre praia refletiva e dissipativa é feita através do seu declive, em que  $\beta \geq 0.1$  e  $\beta < 0.1$ , respetivamente. O parâmetro  $L_{R_u}$  é na verdade um “espraiamento médio quadrático” e controla a intensidade máxima do espraiamento, ou seja, quanto maior for  $L_{R_u}$  maior será a amplitude do espraiamento. Assim, para determinado valor de  $L_{R_u}$  e determinada probabilidade de excedência  $P$ , o espraiamento  $R_u$  obtém-se então da seguinte forma,

$$R_u = L_{R_u} \sqrt{-\ln P} + R_{100} \quad (2.18)$$

Para cada estado de mar (com duração de 1h) simula-se aleatoriamente uma altura significativa ao largo. A simulação da altura significativa é feita através dos parâmetros da função de distribuição de *Gumbel* para o regime médio e de extremos. A partir dos parâmetros de *Gumbel*, é proposto no AILPE, o cálculo de um parâmetro  $F$ , que faz a separação entre o regime médio e o regime de extremos,

$$F(i) = \exp \left[ -\exp \left( \frac{\lambda_e(i) - \lambda_m(i)}{\delta_e(i) - \delta_m(i)} \right) \right] \quad (2.19)$$

em que, para a direção  $i$ ,  $\lambda_e(i)$  e  $\lambda_m(i)$  são os parâmetros de localização do regime de extremos e médio, respetivamente, de altura de onda significativa ao largo. Os parâmetros  $\delta_e(i)$  e  $\delta_m(i)$  são os parâmetros de escala do regime de extremos e médio, respetivamente, da altura de onda significativa ao largo. Na aplicação do método de *Gumbel* aos valores de altura de onda significativa obtidos por retropropagação, são determinados os parâmetros  $A$  e  $B$  que, por sua vez, resultam do ajuste linear aos valores pelo método dos mínimos quadrados e que podem ser relacionados com os parâmetros de localização e de escala da seguinte forma,

$$\lambda = B - \frac{A\sqrt{6}}{\pi} \quad (2.21)$$

$$\delta = \frac{A\sqrt{6}}{\pi} \quad (2.22)$$

A importância do parâmetro  $F$  reside na forma como é obtida a altura de onda significativa em que se gera um número aleatório  $x_{random} \in [0,1]$  e determina-se o valor de altura de onda significativa  $H_0$  correspondente a partir das relações seguintes,

$$\begin{cases} H_0 = \lambda_m - \delta_m \log[-\log(x_{random})], & x_{random} < F \\ H_0 = \lambda_e - \delta_e \log[-\log(x_{random})], & x_{random} \geq F \end{cases} \quad (2.23)$$

Uma vez obtida uma série de alturas de onda significativas, determina-se o período de pico pela relação encontrada em Viegas (2005), tal como se ilustra na Figura 9.

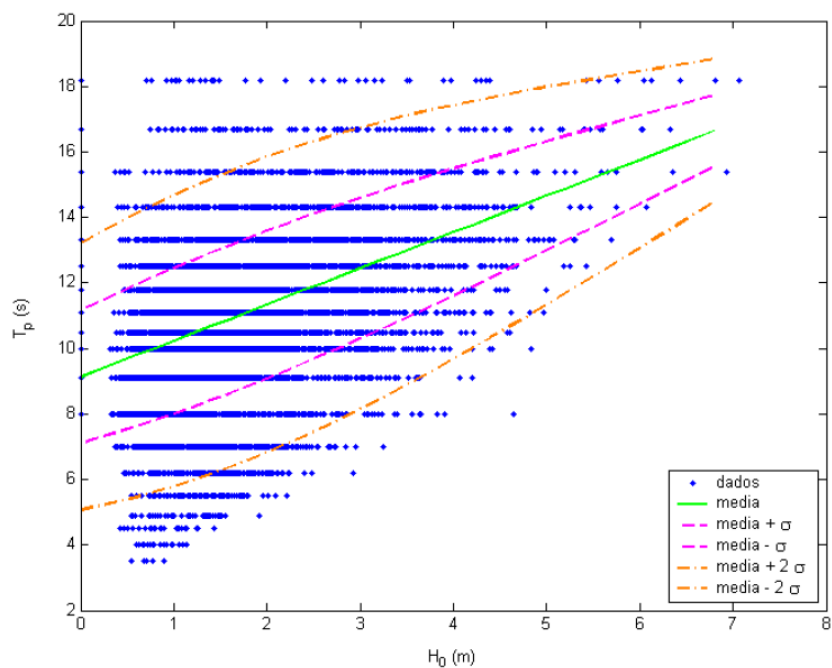


Figura 9 – Relação entre a altura de onda significativa e o período de pico (Viegas, 2005)

O período médio  $T_z$  obtém-se a partir da sua relação com  $T_p$  como a seguir também se exemplifica.

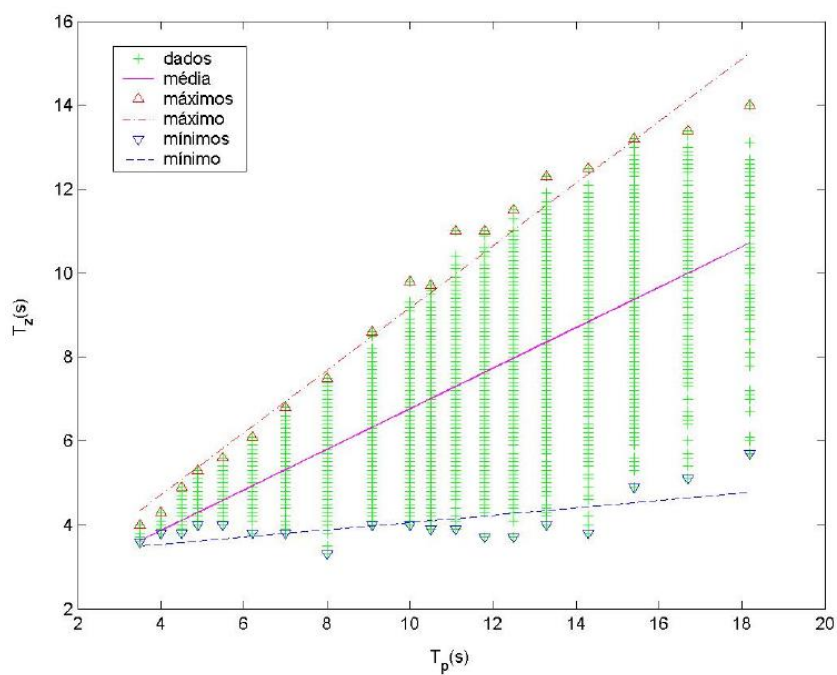


Figura 10 – Relação entre o período médio e o período de pico (Viegas, 2005)

A altura de onda significativa no pé da praia  $H_p$  é obtida através da propagação da onda desde o largo até à profundidade de rebentação, considerando, como já foi mencionado, fenómenos de empolamento e refração das ondas em fundos de batimétricas paralelas à praia.

Assim, o espraçamento é calculado a partir dos valores de  $H_p$  obtidos e, posteriormente, aplicadas as expressões 2.17 e 2.18.

Consideram-se dois tipos de praias, típicas de Portugal: praia dissipativa, com declive ( $\beta$ ) inferior a 0.1, e em que o espraçamento é independente deste declive e praia refletiva, com declive superior a 0.1, e em que o espraçamento depende do declive.

Desta forma torna-se possível obter as cotas de inundação (somatório das contribuições da maré astronómica reconstituída, da sobrelevação meteorológica e do *run-up*). Posteriormente são separados os dados de cotas de inundação em classes de 10cm e obtém-se a função de distribuição do regime médio da cota de inundação para cada tipo de praia.

O regime de extremos é fundamentado nas mesmas hipóteses que o regime médio, e utilizando as mesmas variáveis. Com os valores máximos anuais obtém-se a função de distribuição final do regime de extremos da cota de inundação e os respetivos intervalos de confiança, de forma igual à utilizada para o cálculo do regime de extremos do nível de maré.

#### 2.2.7. RUN-UP EM PRAIAS

Dos vários componentes que intervêm no cálculo final da cota de inundação, o *wave run-up* é um dos mais importantes uma vez que gera inundações instantâneas e contribui significativamente para a erosão das praias.

Este é composto pela acumulação de água na costa devido ao rebentamento das ondas (*wave set-up*) e pelo espraçamento da onda na face da praia, Figura 11.

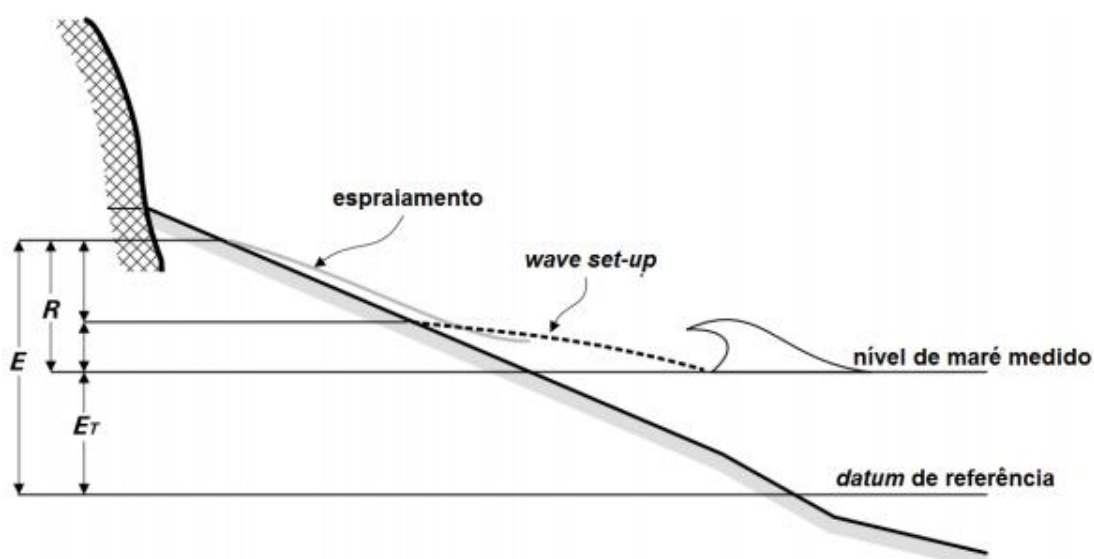


Figura 11 – *Wave run-up* composto pelo *wave set-up* e espraçamento da onda (adaptado de Ruggiero *et al.*, 1997)

De acordo com Ruggiero *et al.* (2001), a erosão de dunas induzida pela ação das ondas ocorre quando o *wave run-up* excede as suas cotas máximas. Assim sendo, conhecer o comportamento do *wave run-up* numa praia é importante para que se possa prevenir os impactos gerados pela inundação da costa e erosão das praias.

Segundo CERC (2002), o *wave run-up* é a elevação máxima da onda, no encontro com a costa, acima do nível médio e pode também ser definido como o maior pico de elevação instantânea de água na costa. Em engenharia costeira, o conhecimento deste fenómeno é fundamental, por exemplo, para o correto dimensionamento de uma obra de proteção.

Relativamente a este assunto, vários autores estudaram e descreveram o comportamento do *wave run-up* sobre estruturas ou em situações controladas em laboratório. Contudo, quando se estuda este fenómeno numa praia, sem estruturas rígidas, as formulações utilizadas pelos autores mencionados não respondem adequadamente.

De seguida é descrita a metodologia utilizada para a determinação do *wave run-up* em praias que consta do *Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español*. Segundo este documento, para estimar de um modo simples a cota e/ou distância alcançada pelo *wave run-up* deverá ser utilizada a formulação de Van der Meer e Janssen (1995). Esta formulação permite determinar o *wave run-up* num perfil composto por dois alinhamentos  $\alpha$  e  $\beta$  e que está ainda dependente das características de percolação e rugosidade, Figura 12.

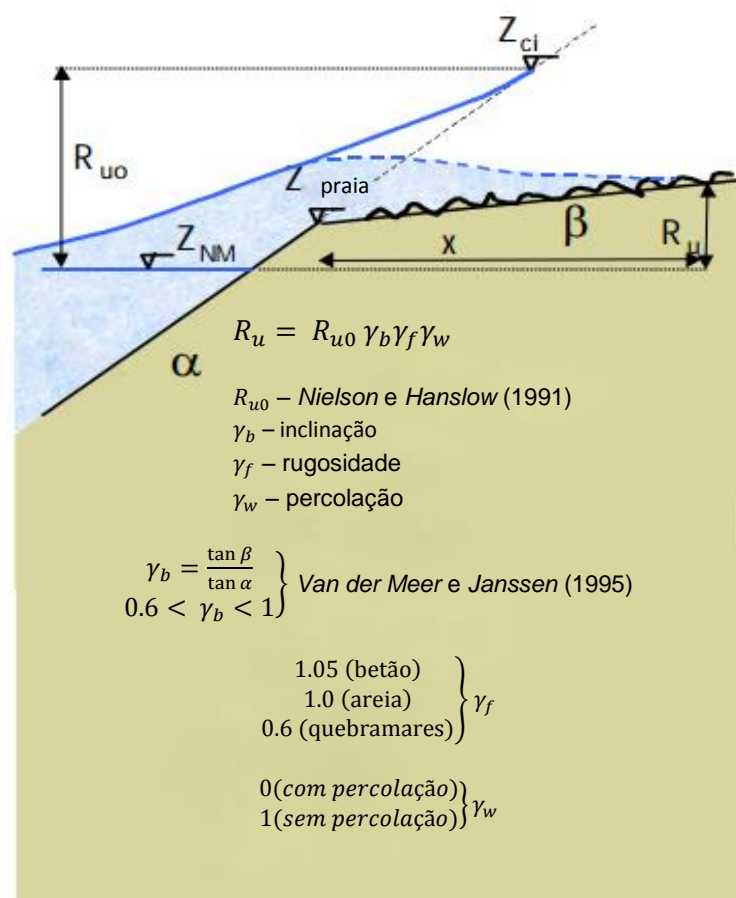


Figura 12 – Formulação de Van der Meer e Janssen (1995) para o cálculo do *run-up* (adaptado de AILPE, 2000)



Depois da obtenção do valor de  $R_{u0}$  segundo Nielsen e Hanslow (1991), a preocupação incide na determinação dos parâmetros indicados na Figura 12,  $\gamma_b$ ,  $\gamma_f$  e  $\gamma_w$ .

O parâmetro que tem em consideração a inclinação do terreno é dado pela formulação de *Van der Meer e Janssen* (1995) e traduz-se da seguinte forma,

$$\gamma_b = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}$$

$$0.6 < \gamma_b < 1$$
(2.24)

Na determinação dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  relativos às inclinações dos alinhamentos da praia serão necessários perfis transversais do terreno. No Capítulo 4 será aplicada a metodologia utilizada no AILPE para quantificar o *run-up* numa determinada praia do troço costeiro Caminha-Espinho. Para tal foi utilizado o levantamento topo hidrográfico LIDAR (*Light Detection and Ranging*), atualizado em 2013, do troço costeiro em estudo.

O LIDAR foi um dos desenvolvimentos tecnológicos mais importantes do final do século passado. O mapeamento digital a *laser* consiste num sistema de sensoriamento remoto ativo que permite a recolha de dados espaciais, tanto da topografia do terreno, como das estruturas verticais presentes na superfície. O seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão de um feixe infravermelho em direção à superfície terrestre. Na superfície, estes feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e captados pelo sensor. Para cada feixe emitido é registado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave, permitindo ao sistema realizar o cálculo da distância.

Este sistema apresenta imensas vantagens uma vez que permite a aquisição de bases geográficas em condições físicas e meteorológicas adversas, a modelação do terreno imediatamente após o voo e ainda possui uma elevada precisão vertical, robustez e homogeneidade no conjunto de dados produzidos.

Para a visualização e o processamento dos dados obtidos pelo LIDAR utilizou-se o *software Global Mapper v16.1*, Figura 13.

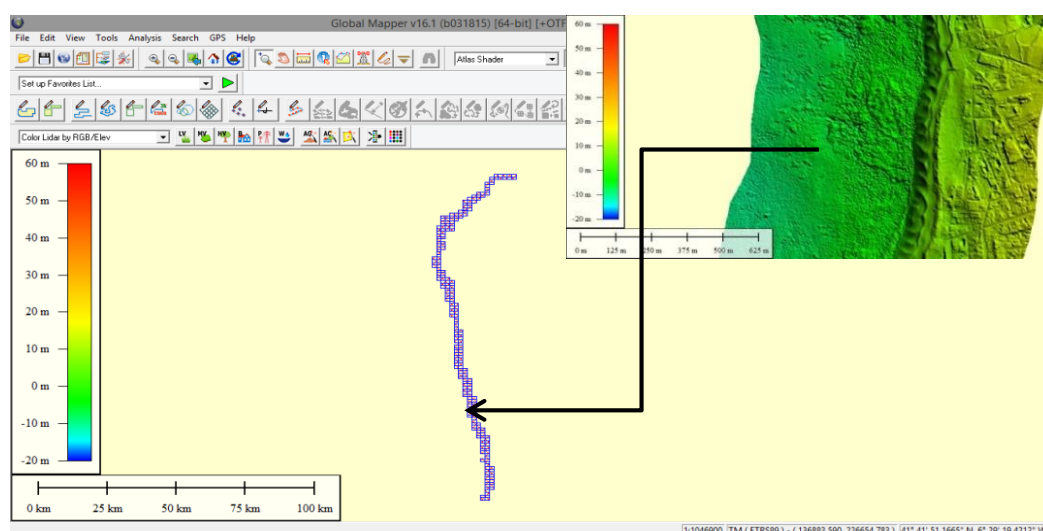


Figura 13 – Processamento dos dados no *Global Mapper v16.1*.

Este *software* permite a obtenção de perfis transversais do terreno para que, posteriormente, sejam calculadas as inclinações dos alinhamentos da praia, Figura 14.

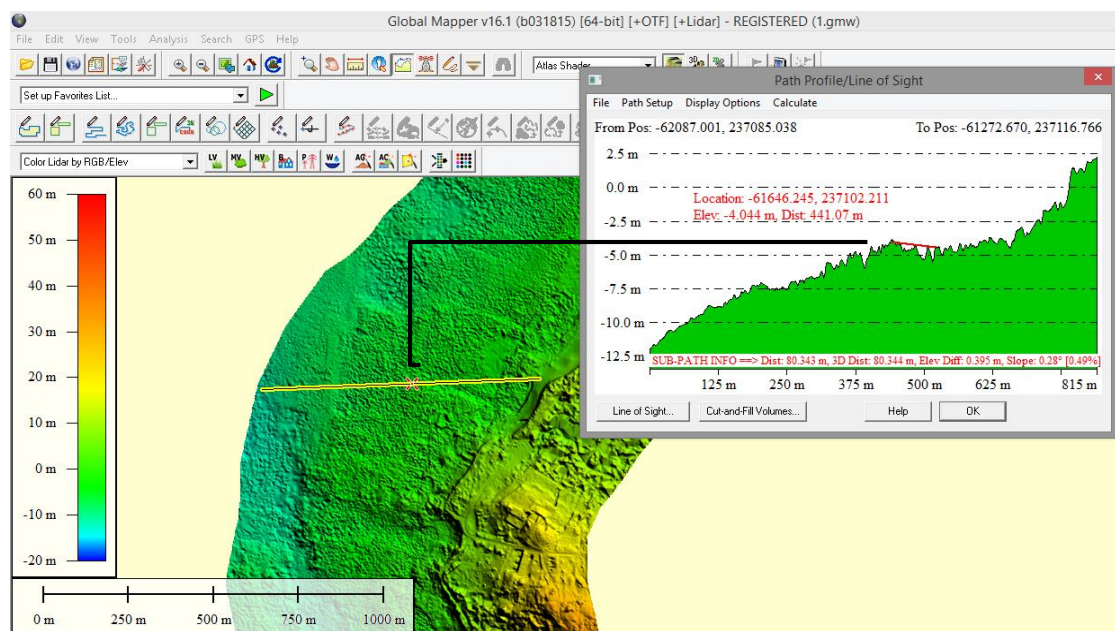


Figura 14 – Perfil transversal do terreno usando o *Global Mapper* v16.1.

Quando se estuda o *run-up* em praias, estas são diferenciadas quanto à existência ou não de estruturas de proteção instaladas. Estas construções alteram a morfologia e dinâmica das praias, conferindo-lhes características distintas, que interferem com vários fenómenos, entre eles o *run-up*.

Assim, nos casos em que existam estruturas de defesa como quebramares opta-se por estudar o galgamento destas, uma vez que será este fenómeno o mais suscetível de causar danos em estruturas, pessoas e bens.

## 2.3. GALGAMENTOS EM ESTRUTURAS MARÍTIMAS

### 2.3.1. INTRODUÇÃO

O galgamento de estruturas marítimas é um fenómeno caracterizado pela passagem de água sobre o seu coroamento devido à ação da agitação marítima incidente. O caudal médio de água que galga as estruturas ( $q$ ), habitualmente medido em  $m^3/s$  por metro linear de desenvolvimento da estrutura, constitui a par da estabilidade da estrutura, um dos principais parâmetros condicionantes em projeto.

A quantificação incorreta dos efeitos do fenómeno pode não só originar implicações de carácter financeiro, como colocar em risco a segurança de pessoas, bens, equipamentos assim como as atividades que justificam a existência dessas mesmas obras de proteção. As estruturas marítimas são dimensionadas para um grau de galgamento admissível, que deverá ser tanto menor, quanto mais sensível ao galgamento for a zona circundante.

Na tentativa de apurar com a maior fiabilidade possível os valores do galgamento na estrutura para evitar o sobredimensionamento/subdimensionamento dessas mesmas obras de engenharia, são

utilizadas ferramentas de modelação e previsão de galgamentos cujos resultados são, por norma, validados em ensaios realizados em modelo físico reduzido.

As expressões matemáticas que estão na base de algumas formulações (empíricas ou semi-empíricas) regularmente usadas no cálculo do galgamento, não conseguem reproduzir fielmente alguns dos fenómenos relevantes no processo de interação da onda com a estrutura, mostrando-se ainda pouco flexíveis relativamente à geometria das estruturas.

### 2.3.2. CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO

Quando uma onda marítima, no seu processo de propagação, encontra um obstáculo, pode, de acordo com as características desse obstáculo e com as suas próprias, contorná-lo, galgá-lo, atravessá-lo (transmitir-se através dele), refletir-se ou dissipar-se contra ele. Em regra nenhum destes fenómenos ocorre isoladamente.

O fenómeno do galgamento em estruturas marítimas está sempre associado à dissipação e frequentemente à reflexão de energia da onda incidente. A energia da onda que não se dissipa por rebentação, por atrito ou por percolação, nem é refletida para o largo, converte-se sob a forma de espraçamento no talude da estrutura. Se a cota do coroamento da estrutura não for suficientemente elevada, para impedir o transporte de massa de água sobre o seu topo, ocorre galgamento.

O galgamento é um fenómeno de previsão complexa tanto no espaço como no tempo devido à ação irregular da agitação marítima. É na definição da geometria da estrutura que reside a possibilidade de controlar e reduzir a ocorrência de galgamento. O parâmetro característico da estrutura mais relevante é a altura do coroamento da estrutura acima do nível médio de água. Quanto maior for aquela distância menos provável se torna o galgamento da estrutura.

No entanto, adotar soluções que contemplem cotas de coroamento exageradamente elevadas que funcionem como obstáculos intransponíveis à passagem da água não só comprometem seriamente o custo da estrutura como criam um impacto visual não desejado na paisagem litoral.

Por isso, intervém-se ao nível de outras variáveis em que o seu papel é reconhecidamente preponderante na diminuição da intensidade do fenómeno, tais como, na inclinação do talude, na dimensão e posição das bermas (ou patamares horizontais), na largura do coroamento, na permeabilidade e rugosidade da estrutura. A colocação de uma superestrutura defletora no topo também permite minimizar os efeitos do galgamento pelo aumento da dissipação e reflexão da energia das ondas incidentes.

Com a finalidade de estabelecer valores admissíveis para o caudal médio de galgamento,  $q$ , o *U.S. Army Corps of Engineers* compilou estudos de vários autores, apresentando valores limites de caudais médios,  $q$ , de acordo com a função da estrutura e o nível de estragos associados.

Recentemente Pullen *et al.* (2007) propuseram uma nova classificação, Quadros 2 a 5, com base nos resultados parciais do projeto Europeu CLASH.

Quadro 2 – Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança de estruturas marítimas (adaptado de Pullen *et al.*, 2007)

Condições e Tipos de Danos		Caudal médio $q$ (L/s/m)
Estruturas de defesa com Talude no Tardoz	Sem danos se o coroamento e o tardoz estiverem bem protegidos.	50 – 200
	Sem danos no coroamento e no tardoz de um dique de argila coberto por relva.	1 – 10
	Sem danos no coroamento e no tardoz mesmo se não estiverem protegidos.	0.1
Defesas Frontais	Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal.	200
	Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas.	50

Quadro 3 – Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança de pessoas (adaptado de Pullen *et al.*, 2007)

Condições e Tipos de Danos	Caudal médio $q$ (L/s/m)
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de que se pode molhar, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar.	1 – 10
Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga. <sup>(1)</sup>	0.1

(1) Estas condições não têm que se verificar todas em simultâneo.

Quadro 4 – Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança de veículos (adaptado de Pullen *et al.*, 2007)

Condições e Tipos de Danos	Caudal médio $q$ (L/s/m)
Circulação a baixa velocidade, galgamento de pouca altura (pulsating overtopping), sem jatos de água a cair na via, veículo não imerso.	10 – 50 <sup>(2)</sup>
Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projetado com grande velocidade ( <i>impulsive overtopping</i> ) ou com jatos de água a cair na via que podem imergir o veículo.	0.01 – 0.05 <sup>(3)</sup>

(2) Estas condições não têm que se verificar todas em simultâneo.

(3) Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima, mas é assumido que a via de circulação se encontra imediatamente atrás da estrutura.

Quadro 5 - Valores críticos do caudal médio de galgamento para a segurança de barcos, edifícios e equipamentos localizados na zona abrigada pela estrutura (adaptado de Pullen *et al.*, 2007).

Condições e Tipos de Danos	Caudal médio $q$ (L/s/m)
Danos significativos ou afundamento de grandes barcos.	50
Afundamento de barcos pequenos localizados a 5-10 m da estrutura. Danos em grandes barcos.	10 <sup>(4)</sup>
Danos em edifícios.	1 <sup>(5)</sup>
Danos em equipamento localizado a 5-10 m da estrutura.	0.4 <sup>(4)</sup>

(4) Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima.

(5) Estes limites estão relacionados com o galgamento efetivo obtido no edifício.

Merecedora de destaque nos quadros anteriores é a gama crítica de caudais médios de galgamento por comprimento unitário da estrutura,  $q$ , que vai desde valores tão pequenos como 0.01 L/s/m (para veículos) até 200 L/s/m (para a estrutura galgada).

### 2.3.2. GALGAMENTO DE ESTRUTURAS MAIS COMUNS

Na tentativa de caracterizar, de uma forma geral, o caudal médio de galgamento no tipo de estruturas costeiras que habitualmente são utilizadas, serão referidas algumas das expressões mais relevantes.

Existem diversas fórmulas empíricas para a determinação do caudal médio de galgamento que ocorre em diferentes tipologias de quebramares a seguir referidos.

#### 2.3.2.1. Quebramares com Taludes Impermeáveis

O método apresentado por Owen (1980) foi desenvolvido com base em ensaios bidimensionais tendo em conta uma agitação incidente perpendicular à estrutura. Neste método o caudal de galgamento e a altura livre do coroamento são adimensionais, podendo ser expressos da seguinte forma,

$$Q^* = \frac{Q}{T_m g H_s} \quad (2.22)$$

$$R^* = \frac{R_c}{T_m (g H_s)^{0.5}} \quad (2.23)$$

em que  $Q^*$  representa o caudal adimensional,  $R^*$  o bordo livre adimensional,  $A$  e  $B$  são os coeficientes empíricos que dependem do perfil do quebramar (Quadro 6),  $Q$  o caudal médio de galgamento por metro de quebramar em m<sup>3</sup>/s/m,  $T_m$  o período de onda na base do talude (s),  $g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),  $H_s$  a altura de onda significativa na base do talude (m) e  $R_c$  a altura livre do quebramar (altura do coroamento do quebramar acima do nível médio da água), Figura 15.

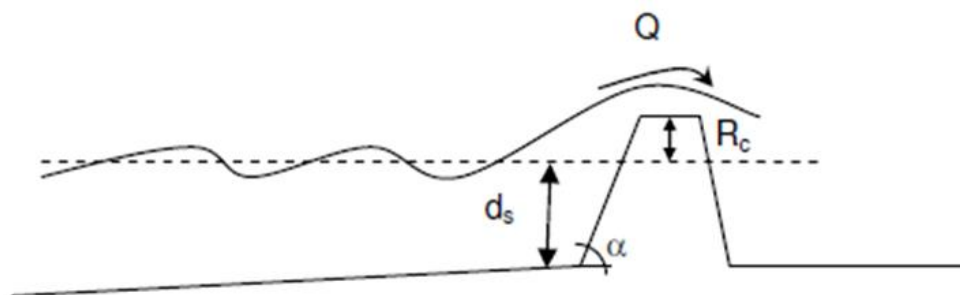


Figura 15 – Variáveis intervenientes no cálculo do caudal de galgamento em quebra-mares de taludes impermeáveis (Lopes, 2005)

A relação entre o caudal e altura livre adimensionais é dada pela seguinte expressão; que pode ser aplicada para quebra-mares com berma abaixo do nível da água desde que se apliquem os coeficientes empíricos modificados  $A$  e  $B$  apresentados no Quadro 7.

$$Q^* = A \exp(-BR^*) \quad (2.27)$$

Quadro 6 – Coeficientes empíricos  $A$  e  $B$  para quebra-mares de taludes (adaptado de Owen, 1980)

TALUDE	A	B
1:1	7.94E-3	20.1
1:1.5	8.84E-3	19.9
1:2	9.39E-3	21.6
1:2.5	1.03E-2	24.5
1:3	1.09E-2	28.7
1:3.5	1.12E-2	34.1
1:4	1.16E-2	41.0
1:4.5	1.20E-2	47.7
1:5	1.31E-2	55.6

Quadro 7 – Coeficientes empíricos A e B para quebra-mares com berma a uma cota inferior ao nível médio da água (adaptado de Owen, 1980)

TALUDE	ELEVAÇÃO DA BERMA	LARGURA DA BERMA	A	B
1:1	-4.0	10	6.40E-3	19.50
1:2			9.11E-3	21.50
1:4			1.45E-3	41.10
1:1	-2.0	5	3.40E-3	16.52
1:2			9.80E-3	23.98
1:4			1.59E-2	46.63
1:1	-2.0	10	1.63E-3	14.85
1:2			2.14E-3	18.03
1:4			3.93E-3	41.92
1:1	-2.0	20	8.80E-4	14.76
1:2			2.00E-3	24.81
1:4			8.50E-3	50.40
1:1	-2.0	40	3.80E-4	22.65
1:2			5.00E-4	25.93
1:4			4.70E-3	51.23
1:1	-2.0	80	2.40E-4	25.90
1:2			3.80E-4	25.76
1:4			8.80E-4	58.24
1:1	-1.0	5	1.55E-2	32.68
1:2			1.90E-2	37.27
1:4			5.00E-2	70.32
1:1	-1.0	10	9.25E-3	38.90
1:2			3.39E-2	53.30
1:4			3.03E-2	79.60
1:1	-1.0	20	7.50E-3	45.61
1:2			3.40E-3	49.97
1:4			3.90E-3	61.57
1:1	-1.0	40	1.20E-3	49.30
1:2			2.35E-3	56.18
1:4			1.45E-4	63.43
1:1	-1.0	80	4.10E-5	51.41
1:2			6.60E-5	66.54
1:4			5.40E-5	71.59
1:1	0.0	10	8.25E-3	40.94
1:2			1.78E-2	52.80
1:4			1.13E-2	68.66

### 2.3.2.2. Quebramares com Taludes Rugosos

O método de Owen (1980) a determinação do caudal de galgamento pode também ser aplicado a estruturas permeáveis, Figura 16, obtendo-se as seguintes expressões,

$$Q^* = A \exp\left(\frac{-BR^*}{r}\right) \quad (2.28)$$

$$Q = Q^* T_m g H_s \quad \text{se } 0.05 < R^* < 0.30 \quad (2.29)$$

em que  $r$  representa o coeficiente de rugosidade, de acordo com os valores indicados no Quadro 8.

Quadro 8 – Coeficientes de Rugosidade (adaptado de Owen, 1980)

TIPO DE TALUDE	COEFICIENTE DE RUGOSIDADE ( $r$ )
Betão ou asfalto	1.0
Blocos de betão com pouca drenagem	1.0
Blocos de pedra não compactados	0.95
Em degraus	0.95
Uma camada de enrocamento sobre base impermeável	0.80
Uma camada de enrocamento sobre base permeável	0.55-0.60
Duas camadas de enrocamento	0.50-0.55

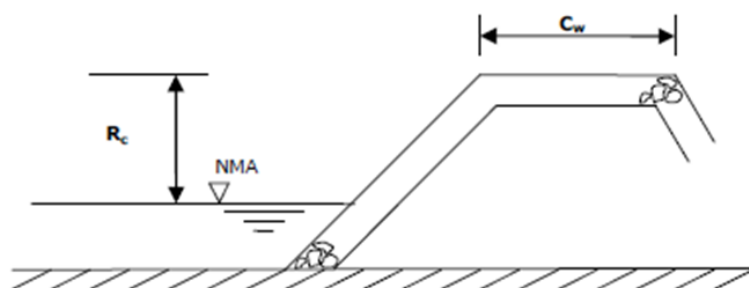


Figura 16 – Variáveis a considerar num talude permeável (Lopes, 2005)

Para que se possa considerar a permeabilidade do coroamento é necessário determinar um coeficiente de redução,  $C_r$ , que é dado pela seguinte expressão,

$$C_r = 3.06 \exp\left(-1.5 \frac{C_w}{H_s}\right) \quad (2.30)$$

$$C_r = 1 \quad \text{se } \frac{C_w}{H_s} < 0.75 \quad (2.31)$$

O valor final do caudal médio de galgamento é obtido pela multiplicação de  $Q$  por  $C_r$ .



### 2.3.2.3. Quebramares Impermeáveis com Defletor

No caso de quebramares com defletores, Figura 17, serão apresentados os métodos baseados no estudo de Owen e Steele (1991). Na consideração do defletor é calculado um parâmetro,  $D_f$ , que representa a razão entre o caudal médio de galgamento com e sem defletor.

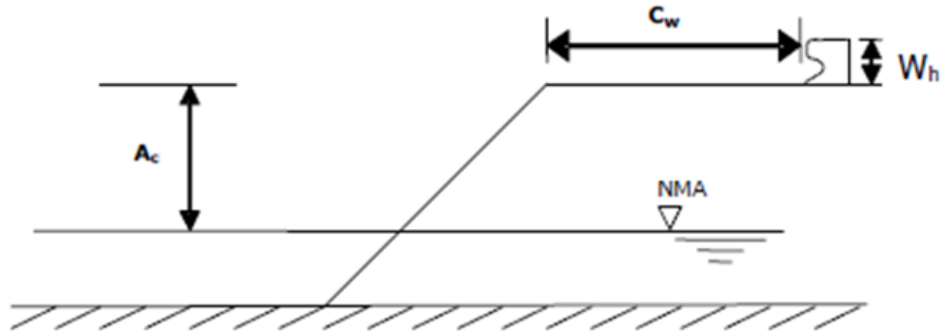


Figura 17 – Definição de um quebramar com defletor (Lopes, 2005)

O cálculo do caudal de galgamento que chega até à base do defletor é dado pelas expressões abaixo indicadas,

$$A_c^* = \frac{A_c}{T_m (g H_s)^{0.5}} \quad (2.32)$$

$$Q_b^* = A \exp(-BA_c^*) \quad \text{se } 0.02 < A_c^* < 0.30 \quad (2.33)$$

$$Q_b = Q_b^* T_m g H_s \quad (2.34)$$

em que  $A_c^*$  representa a altura livre adimensional do quebramar,  $Q_b^*$  o caudal adimensional que atinge a base do defletor e  $Q_b$  o caudal médio de galgamento que atinge a base do defletor por metro de quebramar. No caso de taludes impermeáveis é igual ao caudal que atinge o coroamento do talude. A altura adimensional do defletor,  $W^*$ , é definida da seguinte forma, em que  $W_h$  representa a altura do defletor,

$$W^* = \frac{W_h}{A_c} \quad (2.35)$$

Com os valores da altura adimensional do defletor, da inclinação do talude e da distância horizontal entre o talude e o defletor,  $C_w$ , é possível determinar o fator de ajuste,  $A_f$ , com o auxílio dos Quadros 9 e 10 e conforme o valor da razão entre  $W_h$  e  $A_c$ .

Quadro 9 – Fatores de ajuste do coeficiente de reflexão para quebra-mares impermeáveis ( $W_h/A_c/0.6$ )  
(adaptado de Owen e Steele, 1991)

TIPO DE TALUDE	LARGURA DO COROAMENTO ( $C_w$ )	$A_r$
1:2	0	1.00
1:2	4	1.07
1:2	8	1.10
1:4	0	1.27
1:4	4	1.22
1:4	8	1.33

Quadro 10 – Fatores de ajuste do coeficiente de reflexão para quebra-mares impermeáveis ( $W_h/A_c/0.6$ )  
(adaptado de Owen e Steele, 1991)

TIPO DE TALUDE	LARGURA DO COROAMENTO ( $C_w$ )	$A_r$
1:2	0	1.00
1:2	4	1.34
1:2	8	1.38
1:4	0	1.27
1:4	4	1.53
1:4	8	1.67

Nas situações em que os taludes têm inclinações diferentes das apresentadas nos quadros, os autores sugerem o seguinte:

- Para taludes entre 1:1 e 1:2.5 utilizar o coeficiente apresentado para o talude 1:2;
- Para taludes entre 1:2.5 e 1:4 efetuar interpolação linear;
- Para taludes inferiores a 1:4 utilizar o valor apresentado para o talude 1:4 (solução mais conservativa).

A altura livre adimensional do talude,  $X^*$ , pode ser calculada pela seguinte expressão,

$$X^* = A_f A_c \quad (2.36)$$

Conhecidos os valores da altura livre adimensional do defletor e do talude é possível determinar o valor do parâmetro  $D_f$  recorrendo ao ábaco da Figura 18.

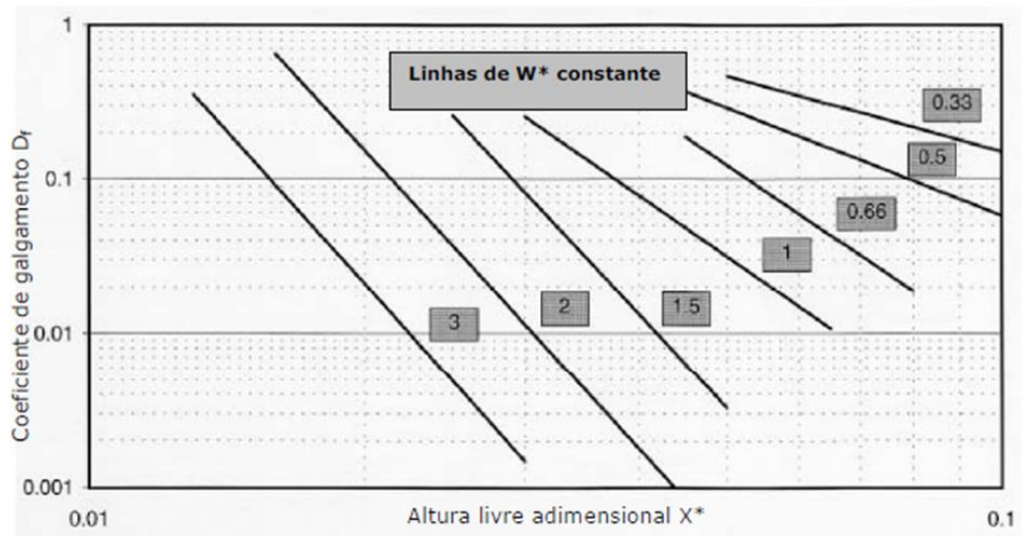


Figura 18 – Ábaco para a determinação do coeficiente de galgamento  $D_f$  para quebra-mares impermeáveis (adaptado de Owen e Steele, 1991)

Assim, é possível obter o caudal médio de galgamento que é dado pela seguinte expressão,

$$Q = Q_b D_f \quad (2.37)$$

#### 2.3.2.4. Quebra-mares Permeáveis com Defletor

No caso de quebra-mares permeáveis com defletor o procedimento é semelhante ao descrito anteriormente para quebra-mares impermeáveis com defletor. Assim, segundo Owen e Steele (1991), as expressões a utilizar são as seguintes,

$$A_c^* = \frac{A_c}{T_m (g H_s)^{0.5}} \quad (2.38)$$

$$Q_b^* = A \exp\left(\frac{-B A_c^*}{r}\right) \quad \text{se } 0.02 < A_c^* < 0.30 \quad (2.39)$$

$$Q_b = Q_b^* T_m g H_s \quad (2.40)$$

em que  $Q_b^*$  representa o caudal adimensional que atinge a base do defletor e  $Q_b$  o caudal médio de galgamento que atinge a base do defletor por metro de quebramar. Uma vez calculado o valor de  $Q_b$  e, de forma a considerar a permeabilidade do talude terá de se calcular o coeficiente de redução,  $C_r$ , e posteriormente calcular o valor de  $Q_c$ , que representa o caudal que resulta da consideração da permeabilidade do talude,

$$C_r = 3.06 \exp\left(-1.5 \frac{C_w}{H_s}\right) \quad (2.41)$$

$$C_r = 1 \quad \text{se} \quad \frac{C_w}{H_s} < 0.75 \quad (2.42)$$

$$Q_c = C_r Q_b \quad (2.43)$$

Sendo a altura adimensional do defletor,  $W^*$ , definida pela razão entre  $W_h$  e  $A_c$  é possível determinar o parâmetro  $D_f$  pelo ábaco da Figura 19.

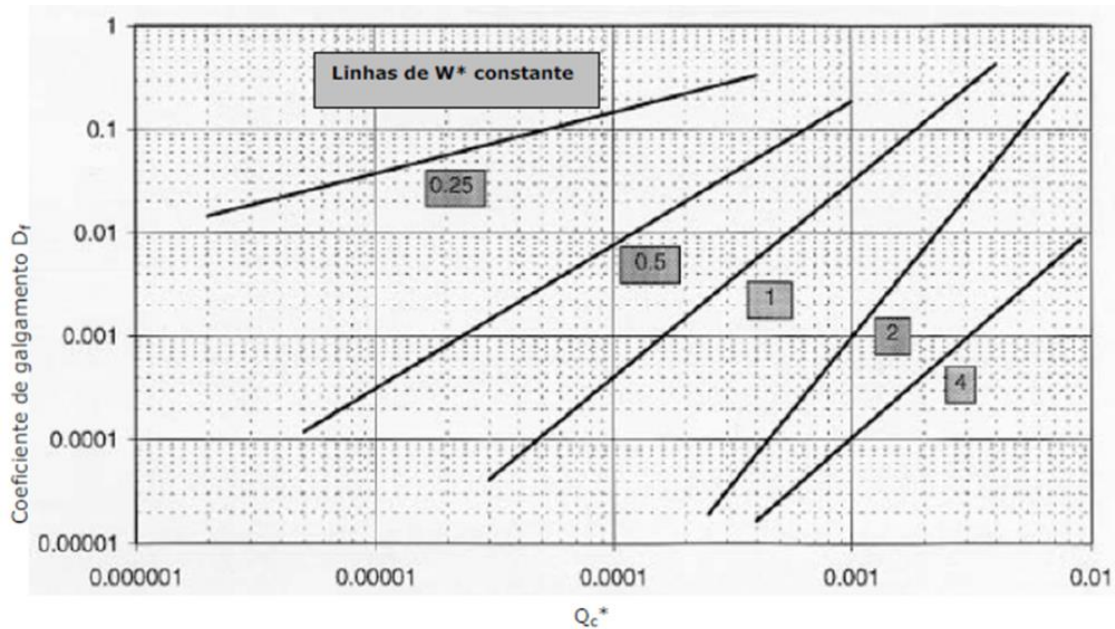


Figura 19 – Ábaco para determinação do coeficiente de galgamento  $D_f$  para quebramares permeáveis (adaptado de Owen e Steele, 1991)

Conhecido o valor do parâmetro  $D_f$ , que permite quantificar o efeito do defletor, é possível obter o valor do caudal médio de galgamento pela seguinte expressão,

$$Q = Q_c D_f \quad (2.44)$$

### 2.3.2.5. Paramentos Verticais

No caso do estudo de estruturas cujos paramentos são verticais, Figura 20, irá utilizar-se o método desenvolvido por Allsop *et al.* (1995). O raciocínio de cálculo para obter o valor do caudal médio de galgamento inicia-se pela determinação do parâmetro  $h^*$  que permite definir se a agitação é muito ou pouco refletida pela estrutura e pode ser definido pela seguinte expressão,

$$h^* = \left( \frac{h}{H_s} \right) \left( \frac{2 \pi h}{(g T_m)^2} \right) \quad (2.45)$$

em que  $g$  representa a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $h$  a profundidade de água na base da estrutura (m),  $H_s$  a altura de onda significativa (m), e  $T_m$  o período da onda na base da estrutura (s).

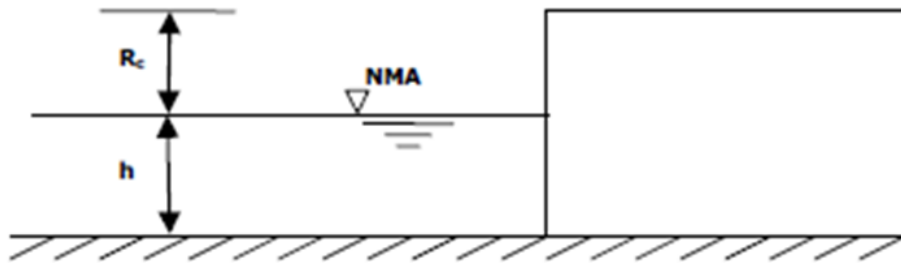


Figura 20 – Definição de variáveis num paramento vertical (Lopes, 2005)

A agitação é significativamente refletida quando  $h^* > 0.3$  e, nesse caso, aplica-se a seguinte expressão,

$$Q^\# = 0.05 \exp\left(\frac{-2.78 R_c}{H_s}\right) \quad \text{se } 0.03 < \frac{R_c}{H_s} < 3.2 \quad (2.46)$$

em que  $R_c$  representa a altura livre do paramento vertical,  $Q^\#$  representa o caudal de galgamento adimensional e relaciona-se com o caudal médio de galgamento (por metro de paramento),  $Q$ , através da seguinte expressão,

$$Q^\# = \frac{Q}{(g H_s^3)^{0.5}} \quad \text{se } 0.03 < \frac{R_c}{H_s} < 3.2 \quad (2.47)$$

A agitação é pouco refletida quando  $h^* \leq 0.3$  e, nesses casos, aplica-se a seguinte expressão,

$$Q_h = 0.000137 R_h^{-3.24} \quad (2.48)$$

em que  $R_h$  representa a altura livre adimensional,  $Q_h$  é o caudal de galgamento adimensional e podem ser expressos pelas seguintes equações,

$$R_h = \left(\frac{R_c}{H_s}\right) h^* \quad \text{se } 0.05 < R_h < 1.00 \quad (2.49)$$

$$Q_h = \frac{Q}{(g h^3)^{3/2}} \quad (2.50)$$

#### 2.3.2.6. Quebramares Mistos

As equações empíricas aqui apresentadas, resultantes de ensaios com este tipo de estruturas, foram desenvolvidas por Allsop *et al.* (1995). Inicialmente definiram um parâmetro  $d^*$  para determinar se o talude deveria ser considerado grande ou pequeno, isto é, se a agitação é ou não afetada pela presença de berma, Figuras 21 e 22.

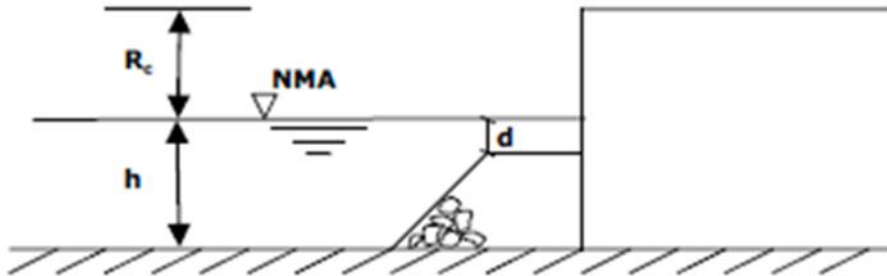


Figura 21 – Esquema de grandes taludes a barlar do paramento vertical (Lopes, 2005)

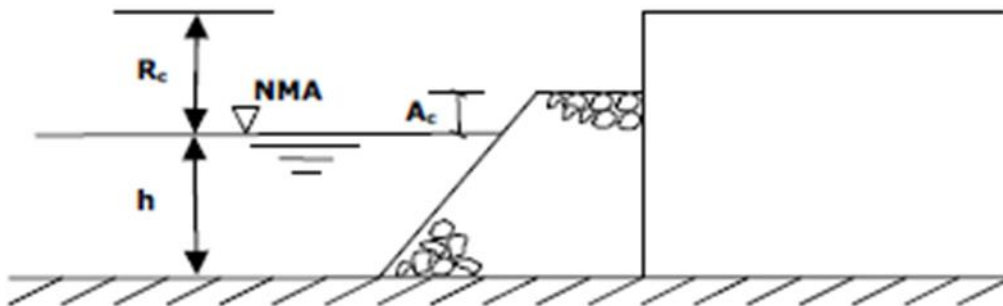


Figura 22 – Esquema de taludes emergentes com o coroamento acima do nível médio da água (Lopes, 2005)

O caudal de galgamento depende do efeito que a berma tem na agitação incidente, ou seja, se permite o seu impacto na estrutura ou se, pelo contrário, provoca a sua reflexão. O galgamento na primeira situação é significativamente superior ao causado na segunda situação apesar de não ser ainda possível distinguir os parâmetros que identificam estes dois tipos de agitação. Assim, a metodologia usada pode ser aplicada a ambas as situações tendo sempre presente que os resultados obtidos para uma estrutura refletora estão sobreavaliados,

$$d^* = \left(\frac{d_b}{H_s}\right) \left(\frac{2\pi h}{(gT_m)^2}\right) \quad (2.51)$$

em que  $d_b$  representa a profundidade da água acima da berma (m). O talude da berma é considerado pequeno se  $d^* > 0.3$ , sendo o comportamento da estrutura idêntico ao dos paramentos verticais simples, quando sujeitos a uma agitação muito refletiva. Assim sendo, neste caso, deve ser utilizado o procedimento descrito para os paramentos verticais.

O talude da berma é considerado grande quando  $d^* \leq 0.3$ , sendo neste caso, o galgamento afetado pela berma. As equações abaixo indicadas foram desenvolvidas para agitação pouco refletida e como tal podem conduzir a soluções conservativas,

$$Q_d = 4.63 \times 10^{-4} (R_d)^{-2.79} \quad (2.52)$$

em que  $R_d$  representa a altura livre adimensional do coroamento dada pela expressão 2.53 e  $Q_d$  é o caudal de galgamento que pode ser relacionado com o caudal médio de galgamento,  $Q$ , pela expressão 2.54.

$$R_d = \left(\frac{R_c}{H_s}\right) d^* \quad \text{se } 0.05 < R_d < 1.00 \quad (2.53)$$

$$Q_d = \frac{Q}{(g d_b^3)^{0.5} d^{*2}} \quad (2.54)$$

Os taludes emergentes comportam-se como quebramares permeáveis com defletor e como tal deve ser seguido o raciocínio atrás sugerido para este tipo de estruturas.

Poderão ainda enquadrar-se numa nova categoria de estruturas as que apresentam uma pequena altura livre relativa, ou seja, quando a razão entre  $R_c$  e  $H_s$  é inferior a 1.5. Estas estruturas comportam-se como paramentos verticais simples e, como tal, pode aplicar-se a expressão seguinte,

$$Q^\# = 0.03 \exp\left(\frac{-2.05 R_c}{H_s}\right) \quad (2.55)$$





Já para descrever a forma geométrica da estrutura são considerados 12 parâmetros: a profundidade da água em frente à estrutura ( $h$ ), a profundidade da água no pé do talude da estrutura ( $h_t$ ), a largura do pé do talude ( $B_t$ ), a rugosidade/permeabilidade do manto ( $\gamma_f$ ), o declive da estrutura abaixo da berma ( $\cot\alpha_d$ ), o declive da estrutura acima da berma ( $\cot\alpha_u$ ), a largura da berma ( $B$ ), a profundidade da água na berma ( $h_b$ ), o declive da berma ( $\tan\alpha_b$ ), o bordo livre ( $R_c$ ), a distância entre o meio da berma de coroamento e o nível de água ( $A_c$ ) e a largura do coroamento da estrutura ( $G_c$ ).

Convém notar que, tanto as formulações empíricas tradicionais como as redes neuronais são ferramentas empíricas, isto porque têm como base um conjunto alargado de testes em modelo físico, limitando assim o cálculo do caudal de galgamento à definição das características tanto das estruturas estudadas, como das condições de onda presentes nos ensaios em modelo físico.

É importante, mais uma vez, salientar que esta ferramenta foi construída com base num conjunto de dados de ensaios, onde obrigatoriamente cada variável de entrada terá um intervalo e valores para o qual é válida. No Quadro 11 pode-se verificar, como exemplo, o intervalo de valores de entrada onde o modelo neuronal é válido referente a uma altura de onda significativa  $H_{m0}=1\text{m}$ , onde consequentemente a utilização de valores fora do intervalo de aplicabilidade fará com que a ferramenta não preveja o galgamento, emitindo uma mensagem de erro.

Quadro 11 – Intervalos de valores de entrada admitidos no uso da ferramenta NN\_OVERTOPPING2 referentes a uma altura de onda significativa de  $H_{m0}=1\text{m}$  (adaptado de CLASH, 2005)

Parâmetro	Máximo	Mínimo
$H_{m0}$	1.0	1.0
$s_{m-1.0}$	0.005	0.07
$\beta$	80.0	0.0
$h$ (m)	20.0	0.9
$h_t$ (m)	20.0	0.9
$B_t$ (m)	10.0	0.0
$\gamma_f$	1.0	0.3
$\cot\alpha_d$	10.0	0.0
$\cot\alpha_u$	10.0	-1.0
$B$ (m)	15.0	0.0
$h_b$ (m)	5.0	-1.0
$\tan\alpha_b$	0.1	0.0
$R_c$ (m)	5.0	0.5
$A_c$ (m)	5.0	0.0
$G_c$ (m)	10.0	0.0

Para o projeto de uma obra marítima devem-se confirmar os valores previstos por esta ferramenta recorrendo a modelos físicos reduzidos, reproduzindo as condições de agitação marítima e a geometria específica da estrutura. Como este programa é baseado essencialmente em modelos físicos de pequena escala, podendo existir efeitos de escala e de modelo ou problemas de medições devido a imprecisões associadas aos equipamentos utilizados, é importante ter em linha de conta o valor de  $q$  corrigido,  $q'$ , que a ferramenta calcula para ter em linha de conta alguns destes efeitos.



# 3

## CASO DE ESTUDO: TROÇO CAMINHA-ESPINHO

### 3.1. INTRODUÇÃO

O troço costeiro compreendido entre Caminha e Espinho apresenta aproximadamente uma extensão de 110 km e engloba os concelhos de Caminha, Viana do Castelo, Esposende, Póvoa de Varzim, Vila do Conde, Matosinhos, Vila Nova de Gaia e Espinho, Figura 24.

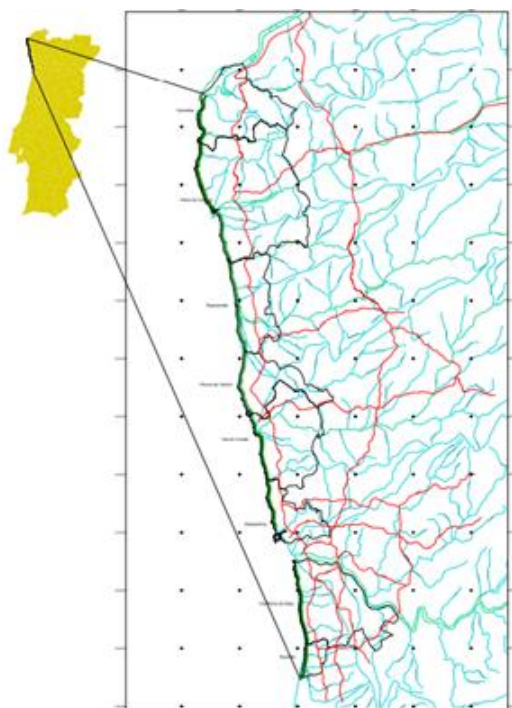


Figura 24 – Planta de enquadramento do troço costeiro Caminha-Espinho (APA, 2015)

Trata-se de um troço com um grande valor natural, mas que suporta simultaneamente uma grande variedade de atividades económicas e culturais, existindo espaços caracterizados por ocupação urbana intensa e desregrada. Na Figura 25 demonstra-se o claro avanço da urbanização na área compreendida entre Aver-o-mar e Póvoa de Varzim (1958 – 2001), facto que aconteceu de uma forma muito rápida, principalmente nos últimos quinze anos do século XX. São muitos os fatores que potenciam a degradação do sistema costeiro, maioritariamente devido a problemas relacionados com a erosão costeira. Estes graves processos erosivos refletem situações de risco para alguns aglomerados populacionais e, em determinados trechos, em toda a frente marítima.

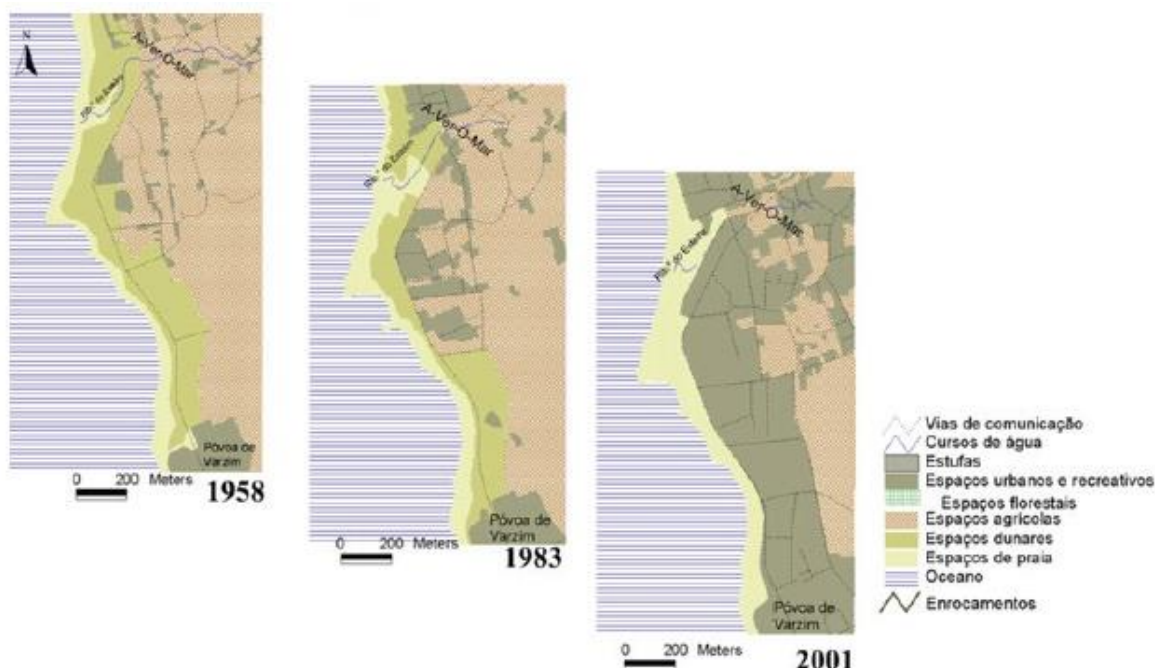


Figura 25 – Avanço da urbanização entre Aveiro-o-mar e Póvoa de Varzim (Cardoso, 2005)

### 3.2. DINÂMICA E EVOLUÇÃO COSTEIRA

A configuração atual do litoral é consequência da contínua interação entre os agentes da dinâmica natural e a ação antropogénica, tornando-se cada vez mais evidente que a compreensão da dinâmica do litoral português é imprescindível para uma correta política de intervenção e de gestão do espaço e do risco na zona costeira.

Os fatores que mais interferem no traçado e posição da linha de costa são de carácter oceanográfico (marés, sobrelevação meteorológica, nível médio do mar, etc). No entanto também o transporte dos sedimentos, a geomorfologia do local e as ações antrópicas podem ter um papel decisivo na evolução da linha de costa.

Na costa portuguesa o transporte sedimentar está intimamente relacionado com a agitação incidente e por isso, de uma forma simplificada, pode-se afirmar que a evolução da linha de costa é devida, essencialmente, à interação entre as ondas, fornecimento sedimentar e a variações do nível médio da água do mar.

O litoral entre Caminha e Espinho caracteriza-se por um clima de agitação fortemente energético que, aliado a uma orientação NNW-SSE a NNE-SSW, provoca um elevado transporte sólido residual, da ordem de  $10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$  (APA, 2014).

Nos finais do século XIX tornou-se evidente um comportamento regressivo do litoral. Esta tendência está diretamente relacionada com a diminuição do fornecimento sedimentar associado à construção de barragens, extração de inertes nos cursos de água e albufeiras, às práticas agrícolas e a construção de obras portuárias.

Estima-se que, atualmente, a construção das barragens seja responsável pela retenção de mais de 80% dos volumes de areias que seriam transportadas pelos rios caso não existissem barragens (APA, 2014).

Deste modo, a ação das ondas e das marés terá consequências ainda mais graves e por vezes irreversíveis, sobretudo quando a capacidade de autorrecuperação dos perfis de praia e das dunas após as tempestades é limitada ou nula.

A vulnerabilidade da ocupação humana a galgamentos oceânicos passou a ser muito maior, cuja consequência foi a construção de estruturas pesadas de engenharia, com a finalidade de proteger as povoações do avanço do mar.

As principais tipologias de estruturas encontradas ao longo da costa noroeste de Portugal Continental são: quebramares, esporões e estruturas longitudinais. Contudo, este tipo de intervenção provoca um desequilíbrio na circulação natural dos sedimentos ao longo do litoral, tendo como principal consequência a acumulação sedimentar a norte das estruturas e o agravamento da erosão a sul, Figura 26, facto que se explica por uma predominância da deriva marítima de NW na linha de costa em questão.

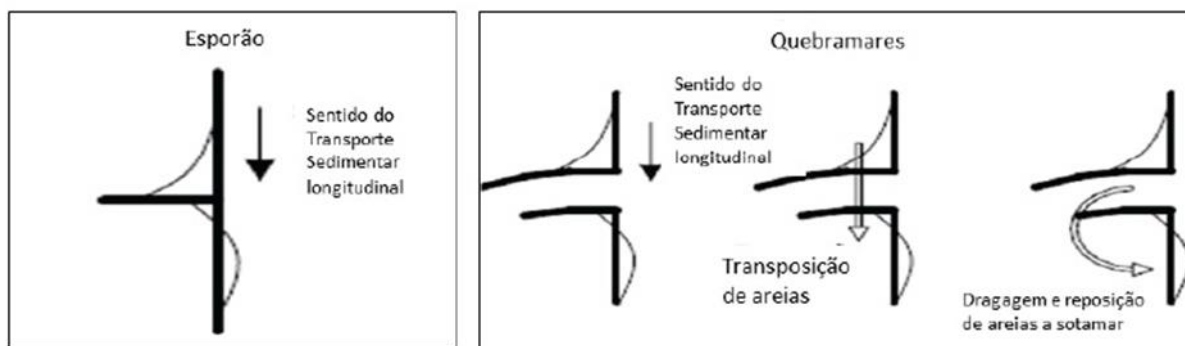


Figura 26 – Acumulação sedimentar provocada por estruturas de defesa costeira (adaptado de Coelho, 2005)

A linha de costa é um elemento geomorfológico que apresenta um grande dinamismo espacial e respostas a processos costeiros de diferentes magnitudes e frequências ao nível espaço-temporal. As mudanças posicionais desta são de natureza complexa e envolvem episódios de elevação do mar (de curto ou longo prazo), variações no balanço sedimentar, atuação de movimentos tectónicos e de origem antropogénica.

As mais recentes técnicas de mapeamento sistemático da linha de costa e acompanhamento das suas mudanças ao longo do tempo proporcionaram a conceção de informações de grande valor para o planeamento e gestão costeira.

A título de exemplo, analisando duas zonas do caso de estudo, verifica-se uma tendência significativa de recuo da linha de costa tanto em Paramos como em Arcozelo, Figura 27. Assim, é importante que a atual sociedade e o governo encarem este fenómeno como uma condição decisiva e limitativa no uso e ocupação da faixa costeira.

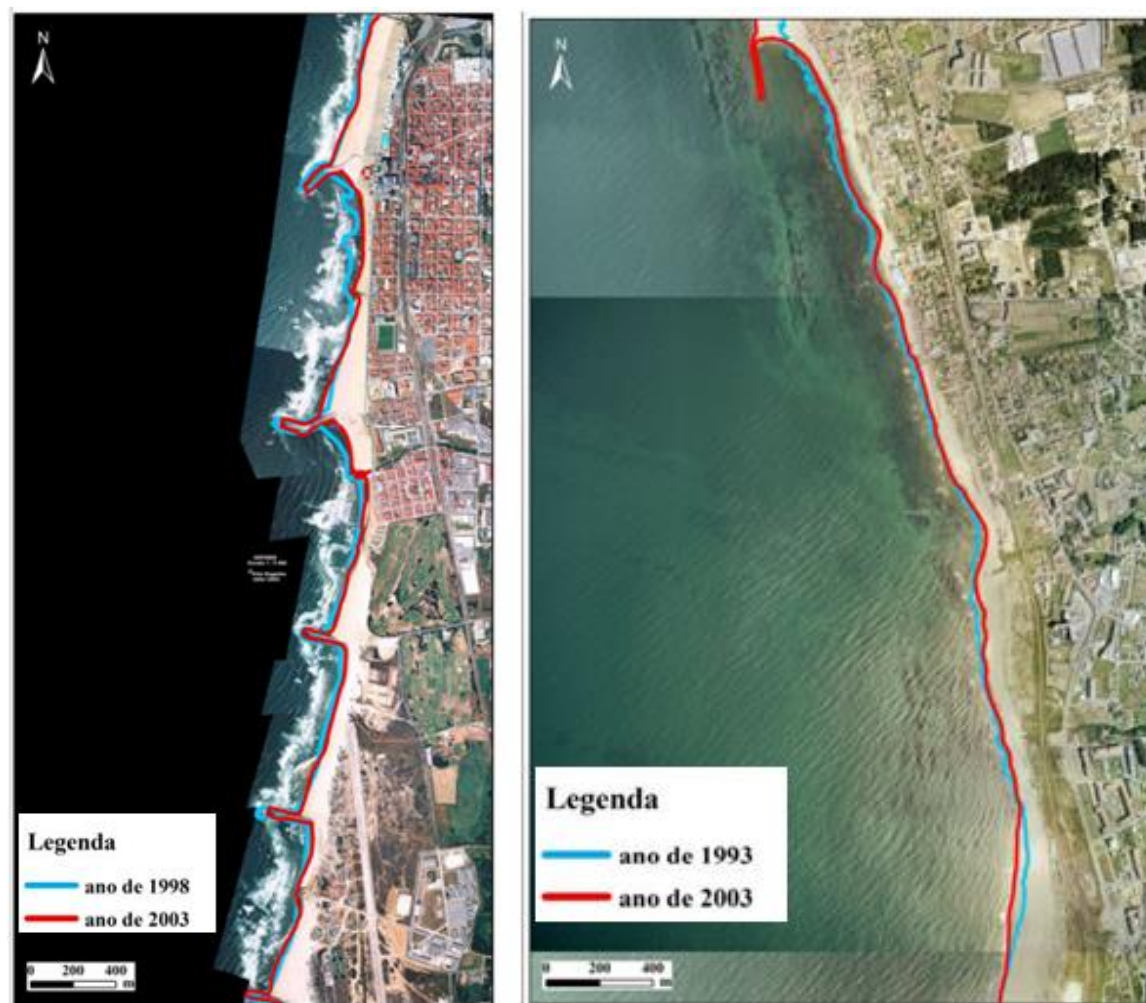


Figura 27 – Variação da linha de costa em Paramos entre 1998-2003 (à esquerda) e em Arcozelo entre 1993-2003 (à direita) [adaptado de Basto, 2009]

Segundo Leathermann *et al.* (2003) um período de 100 anos (ou menos), de análise da tendência a longo prazo da evolução da linha de costa, tem todo o interesse uma vez que permite integrar possíveis processos de elevação do nível do mar e erosão costeira, Figura 28.

A previsão da posição futura da linha de costa constitui um processo que envolve grandes dificuldades, uma vez que a posição da linha de costa num dado momento é o resultado combinado de processos atuantes de longo e curto prazo. Esta previsão torna-se ainda mais complexa ao realizar-se em costas arenosas, uma vez que a sua posição depende bastante da forma como responde a um episódio de temporal severo.





Figura 28 – Previsão da posição da linha de costa na Aguda (à esquerda) e em Paramos (à direita) [adaptado de Basto, 2009]

O aumento do nível médio global do mar (NMGM), consequência das alterações climáticas, provocará uma maior erosão costeira uma vez que as ondas rebentam mais perto da costa. Assim sendo, a médio e longo prazo o aumento do NMGM irá tornar-se um fator determinante no agravamento dos níveis de galgamento, de inundação e erosão costeira. Tais factos, associados a uma notória falta de conhecimento sobre os impactos e respetivos custos, terão consequências muito significativas e gravosas no litoral português. Com os impactos das alterações climáticas nas zonas costeiras a tornarem-se cada vez mais notórios serão necessárias também estratégias de adaptação que incluem medidas de proteção mas também medidas de acomodação e recuo planeado ou realocização.

A atuação futura deverá partir de um esforço conjunto das entidades gestoras públicas e privadas, da comunidade científica e da população local no sentido da reabilitação e preservação das áreas costeiras e dos seus ecossistemas, ultrapassando a visão puramente económica.

### 3.3. PLANO DE ORDENAMENTO DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

#### 3.3.1. OBJETIVOS

A implementação do POOC Caminha-Espinho, aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 25/99, surgiu com o objetivo de conciliação dos valores ecológicos e patrimoniais com as oportunidades de aproveitamento económico dos recursos naturais, bem como a contenção da expansão urbana, em particular nas zonas de risco e de maior sensibilidade ecológica, valorizando a diversidade biológica e paisagística sem esquecer os valores patrimoniais e oportunidades turísticas e de recreio.

Este diploma legal foi alvo de uma alteração através da Resolução do Conselho de Ministros n.º 154/2007 uma vez que no decorrer da implantação do referido POOC verificou-se que o número e as condições dos equipamentos de apoio às praias eram manifestamente insuficientes face à grande afluência de utentes, maioritariamente concentrados nos meses de verão. Esta alteração incidiu sobretudo nas áreas abrangidas pelos planos de praia e nas áreas de proteção costeira.

A implementação do POOC Caminha-Espinho trouxe dificuldades que têm sido avaliadas e que merecem diversas reflexões. Há necessariamente aspetos positivos ao nível da requalificação, valorização e defesa dos valores naturais da orla costeira conseguidos com esta legislação. No entanto, é de salientar a desadequação de muitas das medidas, sobretudo face à evolução natural destas áreas (em certos casos com recuo da linha de costa), a definição pouco correta das áreas de risco e a desigualdade de tratamento das faixas terrestre e marítima de proteção.

### 3.3.2. EXECUÇÃO DO POOC

A execução de uma grande parte das medidas previstas no POOC Caminha-Espinho está ainda por concretizar. No final do ano de 2005 a taxa de execução física variava entre 58% nas intervenções relacionadas com proteção e 13% nas ações de valorização, sendo que ao nível da monitorização prevista foi nula.

Relativamente à taxa de execução financeira verifica-se que dos 38.2 milhões de euros previstos para a execução do POOC foram gastos cerca de 18,7 milhões de euros o que corresponde a uma percentagem de execução de cerca de 50%, dos quais 65% foram investidos em defesa costeira e 31% na requalificação das praias. De referir que há ainda a acrescentar um montante de 2,4 milhões de euros de investimento não programado no plano de financiamento do POOC, sendo cerca de 80% relativo a intervenções de defesa costeira e o restante repartido por estudos e monitorização e assessoria técnica. A repartição do investimento total realizado até final de 2005 pode ser analisada na Figura 29, em que é feita a distinção por tipologia de intervenção.

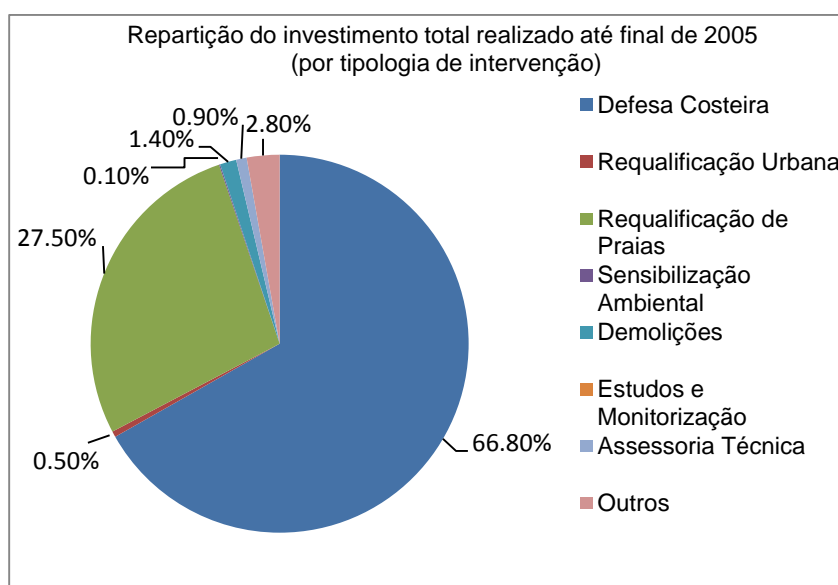


Figura 29 – Repartição do investimento total realizado até ao final de 2005 por tipologia de intervenção (adaptado de Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2013)



### 3.2. DIFICULDADES DE EXECUÇÃO

A correta execução do POOC Caminha-Espinho é condicionada por muitos fatores. Há uma grande resistência, por parte dos “concessionários de praia”, em efetuar investimentos por considerarem que há uma desproporção entre os prazos das licenças, as áreas dos apoios de praia e o montante a investir. A não concretização das UOPG (Unidades Operativas de Planeamento e Gestão), das quais dependem muitas das ações de requalificação das frentes de mar, e a inexistência de incentivos às autarquias para procederem à elaboração dos respetivos planos de urbanização e de pormenor são aspetos, entre muitos outros, apontados como entraves à execução do referido POOC.

Como já foi anteriormente mencionado, as zonas costeiras são particularmente vulneráveis aos impactes dos processos de globalização e de alterações climáticas e, por isso, exigem uma gestão cuidadosa, transparência e disponibilização de informação atualizada e acessível aos cidadãos.

### 3.4. TEMPORAIS DO INVERNO DE 2014

#### 3.4.1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos têm sido vários os temporais (registos de agitação marítima ao largo cuja altura significativa da onda excedeu 5m) que afetam este troço costeiro provocando sérias alterações morfológicas da faixa costeira e danos estruturais, designadamente em termos de: erosão das praias/recuo do cordão dunar adjacente; fenómenos de galgamento oceânico e inundação costeira; danos em infraestruturas de proteção/defesa costeira; danos em infraestruturas de fruição pública (paredões, passeios marginais, estacionamento, estradas); danos em equipamentos, apoios de praia e apoios balneares.

O mais recente temporal registado em Portugal Continental ocorreu entre dezembro de 2013 e janeiro de 2014. Registaram-se vários temporais sucessivos em que o valor da  $H_s$  foi superior a 6m em Leixões, de acordo com os dados do Instituto Hidrográfico. Os valores atingidos pela  $H_s$  e pela altura máxima de onda neste temporais, não são excecionais, dado que correspondem, na sua maioria, a períodos de retorno de 5 e 10 anos. Porém, a sucessão de temporais com valores elevados de  $H_s$  num período de tempo relativamente curto de dois meses é excecional, Figura 30.

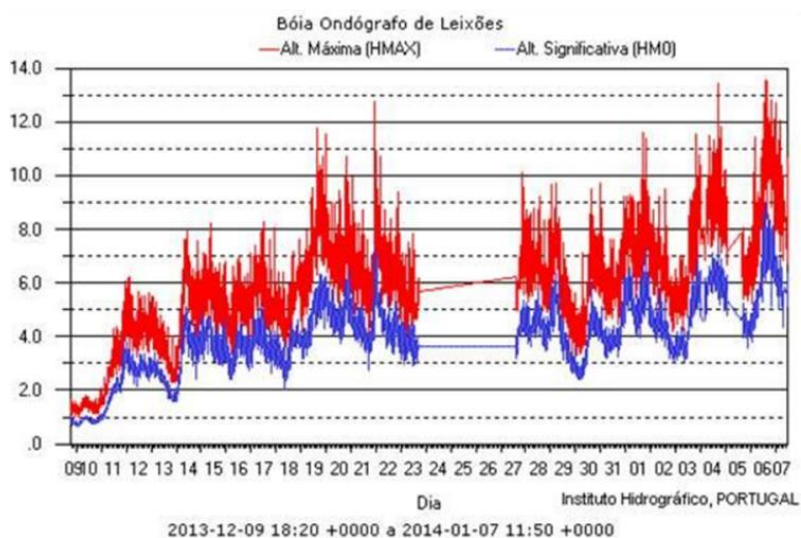


Figura 30 – Valores atingidos pela altura significativa no temporal do inverno de 2014 (APA, 2014)

Na maioria do litoral português esses temporais tiveram um impacto muito significativo, independentemente da gravidade dos fenómenos de erosão e heterogeneidade dos danos nas infraestruturas presentes.

Considera-se que a maximização dos fenómenos de galgamento e inundação ocorridos em inúmeros locais da faixa costeira terá estado relacionada com a conjugação de dois fatores: a coincidência temporal de picos de altura de onda da agitação marítima com a ocorrência de preia-mar de águas vivas e a ocorrência de períodos de onda muito longos, Figura 31.

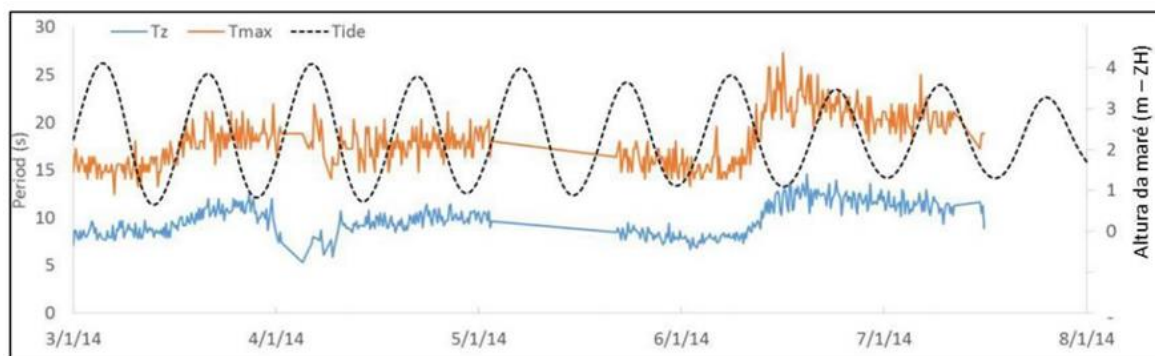


Figura 31 - Picos de altura da agitação marítima (APA, 2014)

Pela análise das Figuras 30 e 31, verifica-se em determinados períodos de tempo, a coincidência temporal de picos de altura de onda da agitação marítima com a ocorrência de preia-mar de águas vivas que, consequentemente, aumenta o potencial erosivo e de inundação.

Nos dias 4/5 e 6 de janeiro de 2014 registaram-se valores de altura máxima ( $H_{max}$ ) ao largo de Leixões de aproximadamente 13.5 m.

De um modo geral, na região norte as principais ocorrências traduziram-se em danos nos passadiços de acesso à praia, na destruição de sistemas de proteção dunar, danos pontuais em equipamentos/apoios de praia e danos localizados em infraestruturas de proteção/defesa costeira. Os concelhos mais afetados foram os de Matosinhos e Vila Nova de Gaia.

#### 3.4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS SITUAÇÕES MAIS GRAVOSAS

Apresenta-se de seguida uma descrição sucinta das situações mais críticas provocadas pelos temporais, numa tentativa de caracterizar as ocorrências em cada um dos municípios que englobam o caso de estudo.

Em Moledo, no município de Caminha, Figura 32, as principais ocorrências consistiram em:

- Agravamento da erosão dunar a norte e a sul do Moinho;
- Avanço do mar sobre a estrada a sul da praia de Moledo;
- Assoreamento do apoio de praia simples da zona sul da praia de Moledo.



Figura 32 – Erosão dunar em Moledo à esquerda [4] e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015)

Também em Viana do Castelo, entre a praia das Mós e a praia da Ínsua, os temporais provocaram elevados estragos, Figura 33, entre os quais se destacam:

- A erosão dunar agravou-se;
- Na praia das Mós, para além da erosão dunar ocorrida, a parte terminal do passadiço que era constituída por escadas foi destruída;
- Destruição de parte dos passadiços existentes (a norte e a sul) de acesso à praia da Ínsua;
- Entre a praia das Mós e a praia da Ínsua, o mar escavou as dunas por detrás do enrocamento que foi construído há anos para defender o antigo viveiro de salmões.

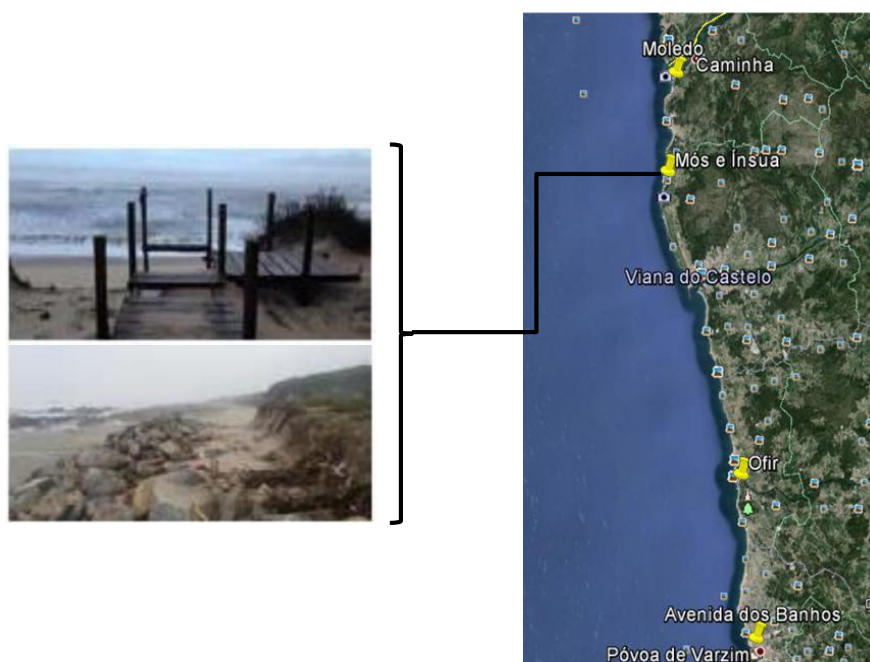


Figura 33 – Destruição de passadiços e erosão das dunas em Viana do Castelo à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015)

Na praia de Ofir, no município de Esposende, os temporais foram responsáveis por situações muito críticas, Figura 34, em que os principais registos consistiram no seguinte:

- Destruição de passadiços de madeira de acesso à praia;
- Desarranjo da proteção frontal da praia de Ofir;
- O campo desportivo do hotel Axis foi alcançado pelo mar e parcialmente destruído;
- Desassoreamento da praia o que leva a dificuldades na acessibilidade.



Figura 34 – Destruição de passadiços e galgamentos em Esposende à esquerda [5] e respetivo enquadramento à direita [Google Earth, 2015]

Na Póvoa de Varzim, mais precisamente ao longo de toda a Avenida dos Banhos, foram notórios os estragos provocados pelos temporais, Figura 35, sendo que os principais registos consistiram em:

- Galgamento do mar para a via pública;
- Destruição do armazém e do posto de socorros do apoio de praia;
- Destruição de montras de loja, provocando inundações no interior dos espaços por invasão do mar;
- Arrombamento de portões de garagem pelas forças das ondas.





Figura 35 – Galgamentos para a via pública na Póvoa de Varzim à esquerda [6] e respetivo enquadramento à direita [Google Earth, 2015]

Em Mindelo, no município de Vila do Conde, a frente urbana está sujeita a processos erosivos intensos, sendo que o recuo da linha de costa foi travado pela existência de estrutura longitudinal aderente. No entanto, nos últimos anos, a estrutura foi degradada pela ação do mar assistindo-se a maior erosão e galgamentos. Na sequência dos temporais do inverno de 2014, verificaram-se novamente estragos e que consistiram principalmente no seguinte:

- Agravamento do desarranjo da proteção longitudinal aderente, havendo sinais de galgamento do mar para a via pública, colocando em risco as habitações adjacentes, Figura 36.



Figura 36 – Destruição da proteção longitudinal aderente em Mindelo à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015)

Em Matosinhos, mais precisamente na Praia de Angeiras, Figura 37, as situações mais críticas consistiram em:

- Assoreamento dos passadiços pela ação do mar em Angeiras Norte;
- Destruição de acessos à praia e passadiços em Angeiras Sul;
- Galgamento do mar para o núcleo piscatório de Angeiras.



Figura 37 – Destruição de passadiços e galgamentos em Angeiras à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015)

No município de Vila Nova de Gaia, no troço compreendido entre Aguda e São Félix da Marinha foram inúmeros os estragos registados, Figura 38, entre os quais se podem destacar os seguintes:

- A travessia e zonas de aproximação à ribeira do Prego foram destruídas;
- Travessia da ribeira do Juncal e plataformas anexas foram destruídas;
- Degradação da estrutura das piscinas da Granja, tendo ficado os alicerces à vista.



Figura 38 – Destruição de passadiços e galgamentos no troço Aguda – São Félix da Marinha à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015)

Já em Espinho, no último município do troço costeiro em estudo, registaram-se igualmente elevados estragos. Na freguesia de Paramos, Figura 39, destacam-se os seguintes:

- Galgamento do mar sobre a via pública;
- Estragos significativos na proteção frontal e arranjos exteriores da Capela de São João;
- Destruição de passadiços.

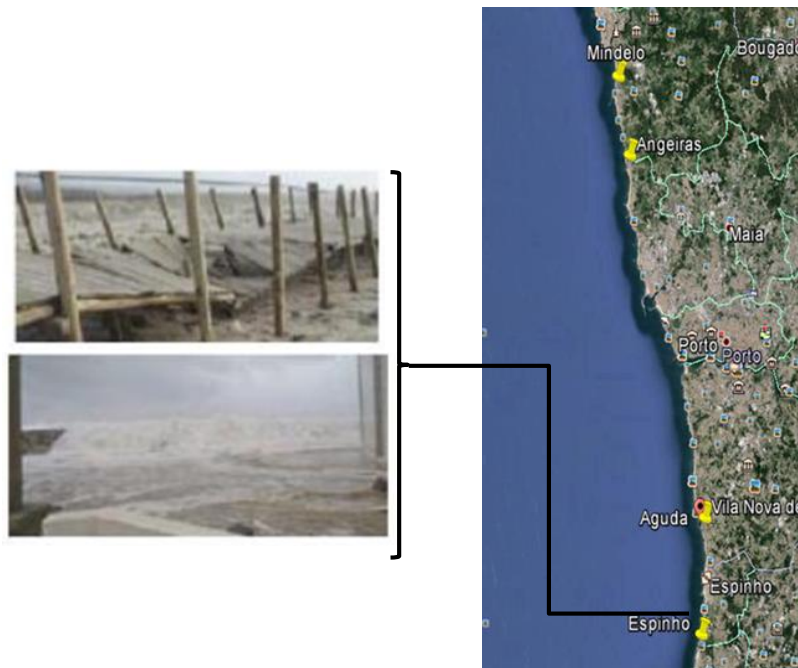


Figura 39 – Galgamentos e destruição de passadiços em Paramos à esquerda (APA, 2014) e respetivo enquadramento à direita (Google Earth, 2015)





## 4

## APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AO CASO DE ESTUDO

### 4.1. INTRODUÇÃO

Apresentam-se neste capítulo os resultados da aplicação da metodologia de cálculo de cotas ou níveis de inundação, descrita no Capítulo 2, ao troço costeiro entre Caminha e Espinho. Numa segunda parte, é também determinado o caudal médio de galgamento numa estrutura pertencente ao mesmo troço costeiro, utilizando formulações empíricas e a ferramenta de cálculo neuronal.

Para a primeira parte, os níveis de maré calculados foram determinados tendo como base os dados do marégrafo de Leixões entre o ano de 2003 e 2013. A estação maregráfica situa-se dentro do porto de Leixões junto ao Terminal dos Contentores Norte.

No Quadro 12 apresentam-se as coordenadas geográficas da localização do marégrafo em *Datum* Europeu (ED50) e WGS84.

Quadro 12 – Coordenadas geográficas do marégrafo de Leixões (adaptado de Instituto Hidrográfico, 2005)

<b>Estação Maregráfica</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b><i>Datum</i></b>
Leixões	41° 11' 16" N	8° 42' 11" W	Europeu (ED50)
	41° 11' 12" N	8° 42' 17" W	WGS84

Nos 11 anos em que foi feita a análise existem falhas nos registos do marégrafo, mas ainda assim foi considerada satisfatória para continuar o procedimento.

No gráfico da Figura 41 apresenta-se, a percentagem de registos e a percentagem de falhas em cada um dos anos utilizados como base de dados para o cálculo dos níveis de maré.

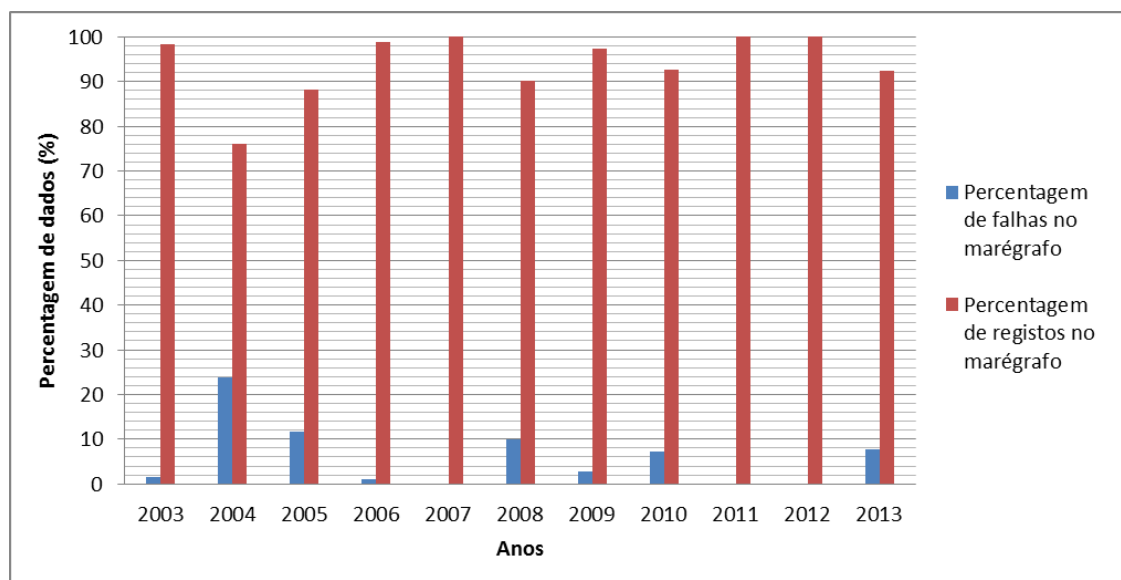


Figura 40 – Falhas nos registos dos dados de maré em Leixões entre 2003 e 2013.

#### 4.2. NÍVEIS DE MARÉ NO TROÇO COSTEIRO CAMINHA-ESPINHO

Inicialmente é feita a reconstituição da maré a partir do cálculo das constantes harmónicas. A análise harmónica foi realizada com o auxílio do *software Tidal Analysis Toolbox*.

Neste *software* são introduzidas as coordenadas geográficas do marégrafo de Leixões, as alturas horárias (variável *tuk\_elev*) e ainda as datas transformadas em números de série (através da função *MatLab* – *datenum.m*) em que foram feitos esses registos de alturas (variável *tuk\_time*). Desta forma, as variáveis *tuk\_elev* e *tuk\_time* são dois vetores anuais com dimensão 8760x1.

No Anexo A é apresentado o ficheiro *output* do *software*. As constituintes harmónicas são caracterizadas pela sua fase e amplitude. Aos pares de valores, amplitude e fase, de cada constituinte dá-se o nome de constantes harmónicas (CH). Das 68 constituintes apresentadas no ficheiro *output* do *software* interessa, sobretudo, salientar as 5 principais constituintes da maré astronómica para o Porto de Leixões, Quadro 13.

Quadro 13 – Constantes harmónicas das principais constituintes da maré astronómica para o Porto de Leixões determinadas através de registos entre 2003 e 2013 pelo *software Tidal Analysis Toolbox*.

Constituinte da maré astronómica	Amplitude – H [m]	Fase – G [°]
M <sub>2</sub>	0.9623	113.12
S <sub>2</sub>	0.3606	102.14
K <sub>2</sub>	0.0946	102.38
K <sub>1</sub>	0.0664	59.41
O <sub>1</sub>	0.0501	353.35

Quando comparadas com os valores apresentados no relatório do Instituto Hidrográfico “Caracterização da Maré do Porto de Leixões”, Quadro 14, verifica-se que existe uma ligeira diferença.

Quadro 14 – Constantes harmónicas das principais constituintes da maré astronómica para o Porto de Leixões (Instituto Hidrográfico, 2005)

Constituinte da maré astronómica	Amplitude – H [m]	Fase – G [°]
M <sub>2</sub>	1.054	74.2
S <sub>2</sub>	0.365	102.5
K <sub>2</sub>	0.104	100.3
K <sub>1</sub>	0.070	59.3
O <sub>1</sub>	0.060	318.0

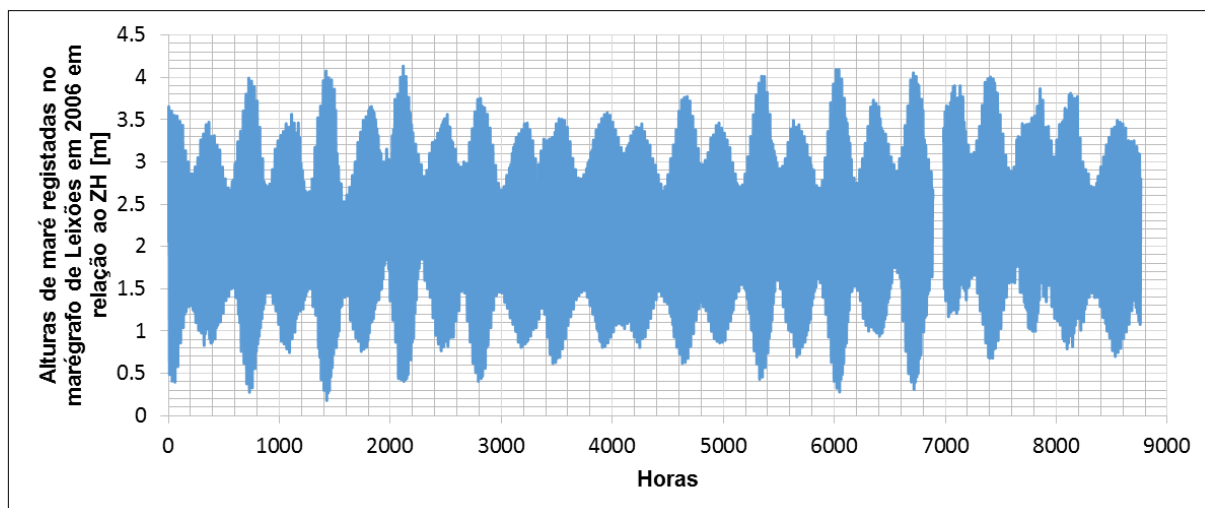
A análise harmónica para a determinação das constantes harmónicas apresentadas no relatório do Instituto Hidrográfico foi efetuada a partir de um ano de observações maregráficas de 31 de Dezembro de 2002 a 30 de Dezembro de 2003.

A constituinte M<sub>2</sub> (onda principal lunar semi-diurna) pela sua elevada amplitude, relativamente às outras, constitui a principal componente da maré astronómica para a área geográfica em estudo. A diferença encontrada entre os valores calculados e os apresentados pelo Instituto Hidrográfico deve-se a vários fatores.

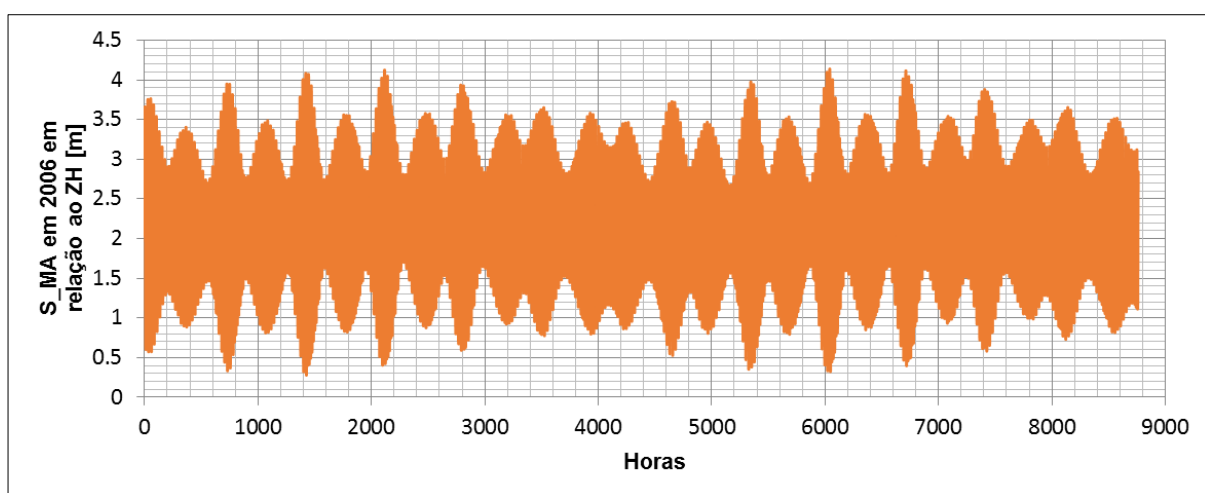
Como se sabe as ondas de maré têm origem astronómica porém, a sua propagação é influenciada, por exemplo, pela batimetria e recorte da linha de costa. As diferenças encontradas podem então estar relacionados com fenómenos como erosão, assoreamentos ou obras costeiras e portuárias. Apesar das constantes harmónicas serem consideradas constantes ao longo do tempo, podem apresentar pequenas variações do seu valor se a zona em questão sofreu alguma modificação das suas características.

Após ser feita a análise harmónica e reconstituída a maré através das constantes encontradas é calculado o resíduo (sobrelevação de origem meteorológica) e ajustado este a um processo Auto Regressivo de Média Móvel (ARMA), tal como foi descrito no Capítulo 2. No cálculo do regime médio foi utilizado o programa escrito em *MatLab*, *mnivmed.m* e que se apresenta no Anexo B.

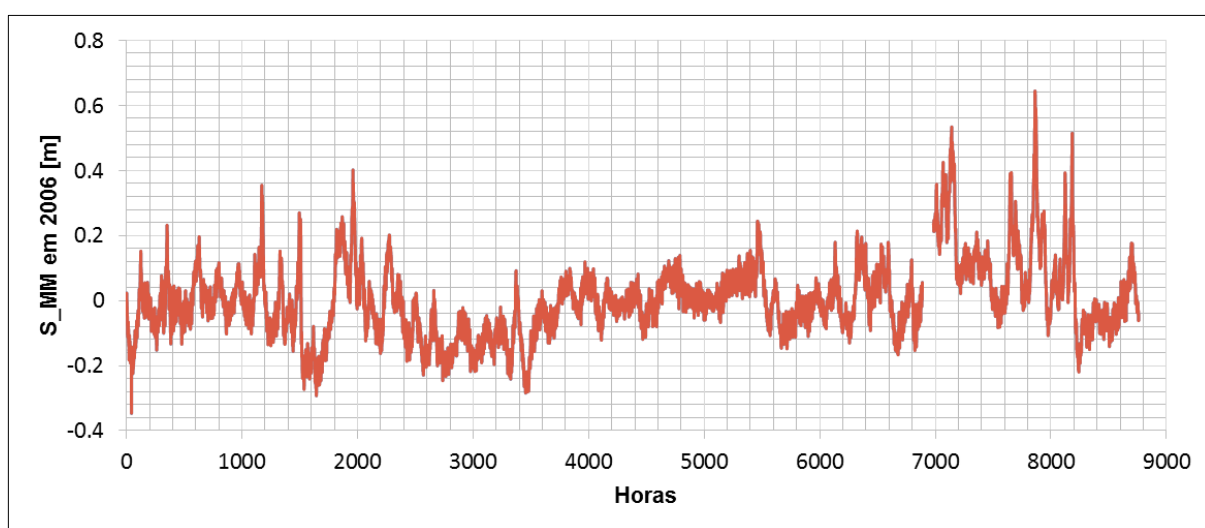
Nos gráficos da Figura 41 é possível observar-se, para o ano de 2006, os dados registados no marégrafo, a maré astronómica (já reconstituída através das constantes harmónicas calculadas) e a sobrelevação de origem meteorológica. Note-se que as quebras nos gráficos a) e c) da Figura 41 referem-se às falhas de registos no marégrafo de Leixões que no ano de 2006 não ultrapassaram os 2%.



a)



b)



c)

Figura 41 – a) Registos no marégrafo; b) Maré astronómica (reconstituída); c) Sobrelevação meteorológica.

A sobrelevação meteorológica é a diferença entre os valores reais da elevação da superfície livre observados nos marégrafos e os devidos apenas à maré.

Como esperado, os valores da sobrelevação meteorológica são de poucos centímetros acima do nível de maré esperado (ultrapassando raramente 50 cm). Em certas condições extremas de tempestade, estes valores podem atingir a ordem do metro; caso haja coincidência de tempestades com marés particularmente altas, como sejam as marés vivas, valores elevados de sobrelevação meteorológica podem ter consequências desastrosas.

Relativamente ao regime médio do nível de maré, foi obtido o gráfico de probabilidade de ocorrência de um nível de maré superior a um determinado valor. Para tal a série de níveis obtidos por simulação, foi previamente ordenada, tendo sido associada a cada nível uma probabilidade  $P_{NM}$ , tal como na expressão 2.4.

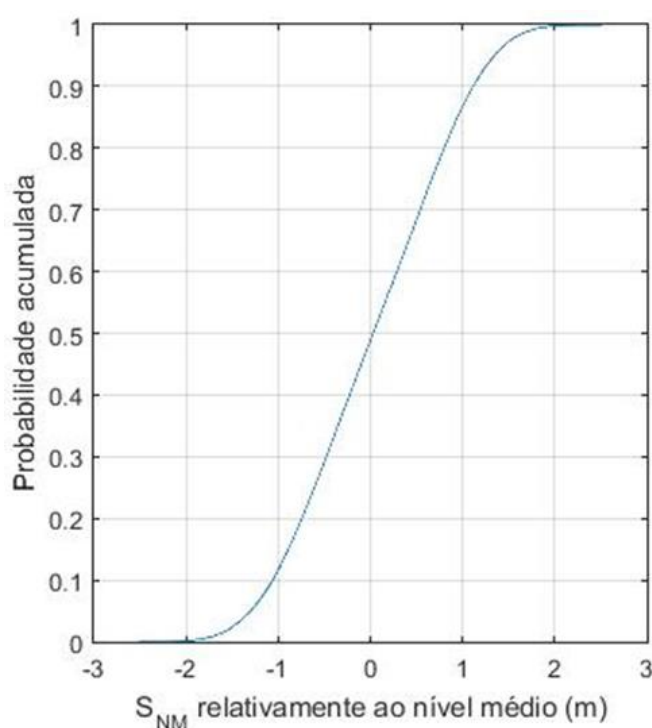


Figura 42 – Níveis de Maré relativos ao regime médio

Uma outra forma de visualizar facilmente os resultados é calculando o número de horas por ano em que um dado nível é excedido. Este gráfico é obtido utilizando a expressão 2.5.

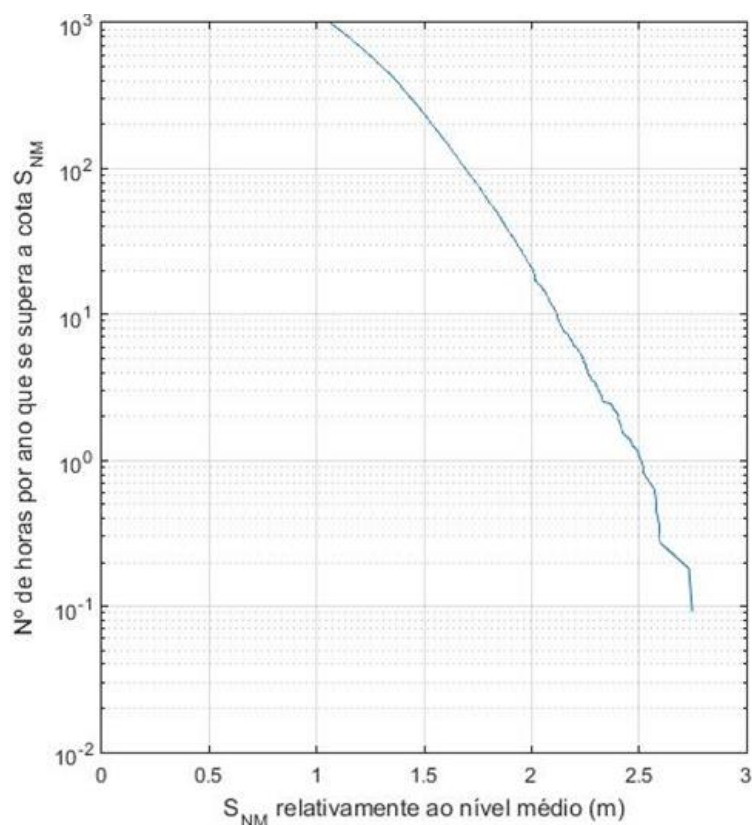


Figura 43 – Número de horas por ano em que a cota  $S_{NM}$  é excedida

Da leitura do gráfico da Figura 43 verifica-se, por exemplo, que o nível  $S_{NM} = 2.5$  m é excedido somente durante menos de 1 hora por ano.

Quanto ao regime de extremos, este foi calculado a partir dos máximos anuais da série de 11 anos de níveis de maré disponível que, posteriormente, foram ajustados a uma Função de Distribuição de Extremos tal como descrito em 2.2.4.2.

Quadro 15 – Máximos anuais da série de 11 anos de Níveis de Maré.

Ano	Níveis de maré máximos [m] referidos ao ZH
2003	4.189
2004	4.415
2005	4.740
2006	4.524
2007	4.305
2008	4.556
2009	4.248
2010	4.359
2011	4.256
2012	4.400
2013	4.507

A função de distribuição de probabilidade é então apresentada da seguinte forma,

$$F(x) = e^{-e^{-7.868(x-4.336)}} \quad (4.1)$$

A equação anterior resulta do ajuste linear aos valores pelo método dos mínimos quadrados, de onde resultou os seguintes valores para os diferentes parâmetros intervenientes:

- Média ( $\mu$ ): 4.409
- Desvio-padrão ( $\sigma$ ): 0.163
- Moda ( $x_0$ ): 4.336

Após a determinação da função de distribuição relativa ao regime de extremos é ainda possível obter um intervalo de confiança de 90%, apresentado a cor azul no gráfico da Figura 44, seguindo a expressão 2.12.

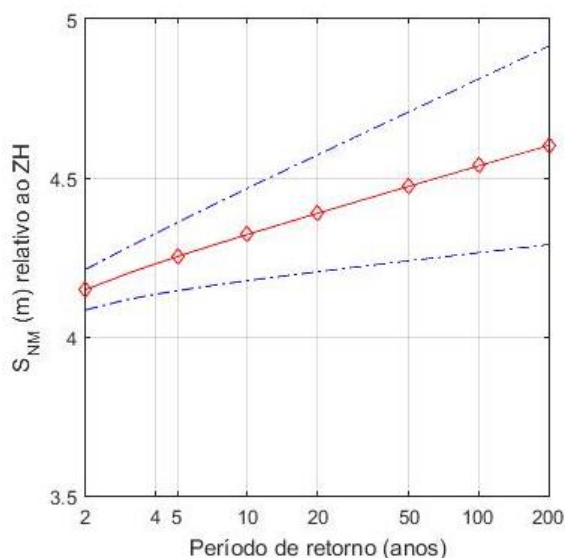


Figura 44 – Níveis de maré relativos ao regime de extremos

A informação, para obtenção do gráfico da Figura 44, encontra-se descrita no Quadro 16.

Quadro 16 – Cálculo do regime de extremos dos níveis de maré.

Período de retorno ( $T_M$ ) [anos]	$K$	$S_{NM}$ [m]	Intervalo de Confiança de 90%
2	-0.16428428	4.158	[4.098; 4.209]
5	0.71944517	4.216	[4.155; 4.248]
10	1.30455097	4.259	[4.159; 4.412]
20	1.8657985	4.392	[4.163; 4.458]
50	2.59227586	4.479	[4.208; 4.697]
100	3.1366684	4.548	[4.251; 4.762]
200	3.67907455	4.623	[4.258; 4.891]

#### 4.3. COTA DE INUNDAÇÃO NO TROÇO COSTEIRO CAMINHA-ESPINHO

Os níveis de maré obtidos (regime médio e regime de extremos) para o período compreendido entre 2003 e 2013 são, como se verifica nas Figuras 4 e 7, semelhantes aos obtidos em Viegas (2005).

Como já foi mencionado no subcapítulo 2.2.4, em Viegas (2005) foi feito o estudo dos níveis de maré no mesmo troço costeiro em estudo neste trabalho e tendo como base os registos do marégrafo de Leixões entre 1979 e 1986.

Atendendo à semelhança das conclusões retiradas acerca dos níveis de maré e devido à complexidade e à morosidade do estudo da agitação marítima, adotaram-se, os resultados obtidos por Viegas (2005) para a análise da agitação marítima e, desta forma, dar continuidade ao trabalho presente.

No entanto, é importante referir ainda alguns aspetos que, na análise dos resultados, devem estar presentes. Um deles é o facto de se ter assumido que a propagação da agitação marítima que afeta uma dada praia é calculada pela Lei de *Snell*, ou seja, admitindo uma batimetria reta e paralela, hipótese que em muitas praias não se verifica. É também importante salientar que um resultado mais rigoroso seria possível caso se utilizassem dados de base em estações maregráficas e oncográficas que abrangessem um maior número de anos.

Feitas estas salvaguardas será feita uma análise aos resultados obtidos por Viegas (2005) relativos à agitação marítima, sendo que quanto aos níveis de maré serão utilizadas as conclusões retiradas a partir da base de dados entre 2003 e 2013 e apresentadas em 4.2.

Os dados de agitação marítima utilizados para caracterizar o regime de agitação no Norte de Portugal são relativos à boia de Leixões entre 1996 e 2001. A zona de aplicação considerada é um troço de costa alinhado com a direção NNW-SSE, ou seja, orientado a WSW, Figura 45.

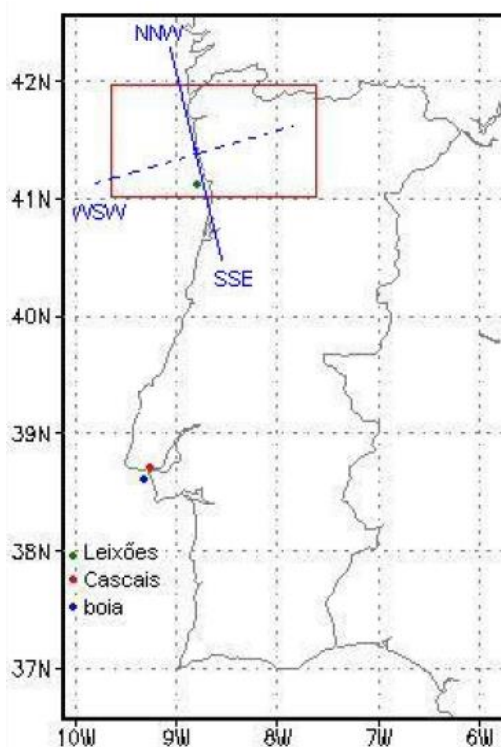


Figura 45 – Zona de aplicação da metodologia e sua orientação (Viegas, 2005)



Em Viegas (2005) foram analisados os dados de agitação marítima (relativos à boia de Leixões entre 1996 e 2001) e classificados estes por direção de proveniência da agitação e por altura significativa da onda, verificando-se que a direção mais frequente é a direção NW. A partir destes dados fez-se a sua retro propagação conforme descrito em 2.2.5. O regime resultante, correspondente à agitação ao largo, é apresentado na Figura 46. Cada setor representa um intervalo de direções de agitação, as várias cores em cada setor correspondem a diferentes classes de valores da altura de onda significativa da agitação marítima para essa direção.

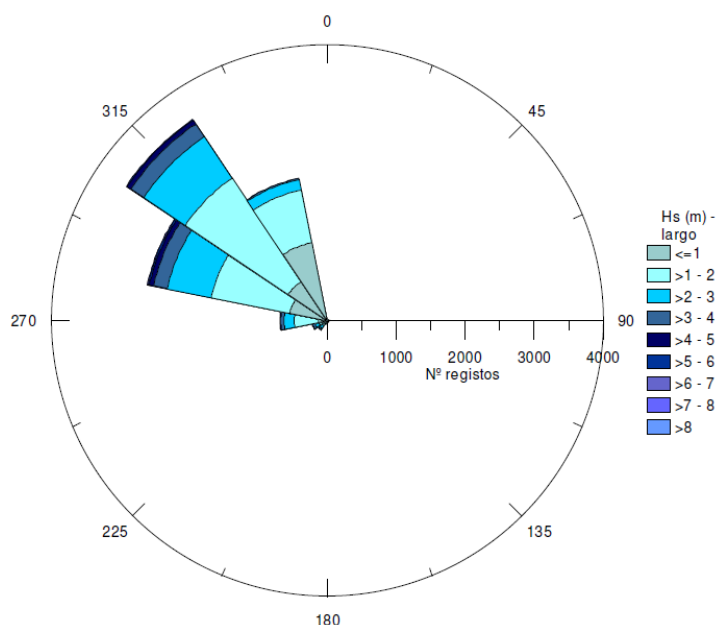


Figura 46 – Dados de agitação marítima ao largo (Viegas, 2005)

A partir dos dados obtidos para a agitação ao largo, fez-se então a propagação dos estados de mar em direção à praia, calculando-se os coeficientes de empolamento e de refração até à profundidade de rebentação. O regime obtido através deste procedimento é apresentado na Figura 47.

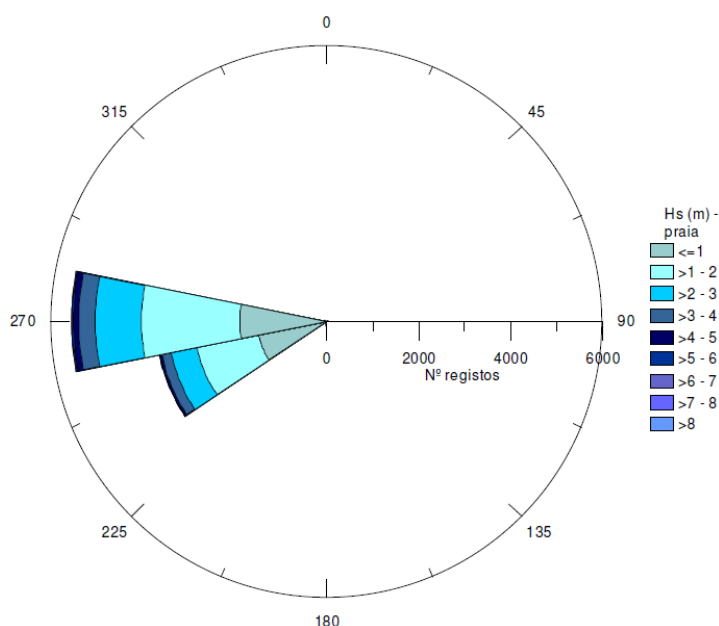


Figura 47 – Dados de agitação marítima junto à praia (Viegas, 2005)

Da análise da Figura 47, verifica-se que junto à praia a agitação marítima sofre uma rotação acentuada em relação ao largo, e apresenta-se como vinda essencialmente de duas direções predominantes, oeste e oeste-sudoeste.

Apesar de os resultados obtidos a partir da propagação da agitação marítima indicarem apenas duas direções predominantes, em Viegas (2005) é possível perceber o comportamento para outras possíveis direções. Na Figura 48 apresenta-se o regime médio de cota de inundação para uma praia dissipativa com a orientação do troço costeiro em estudo.

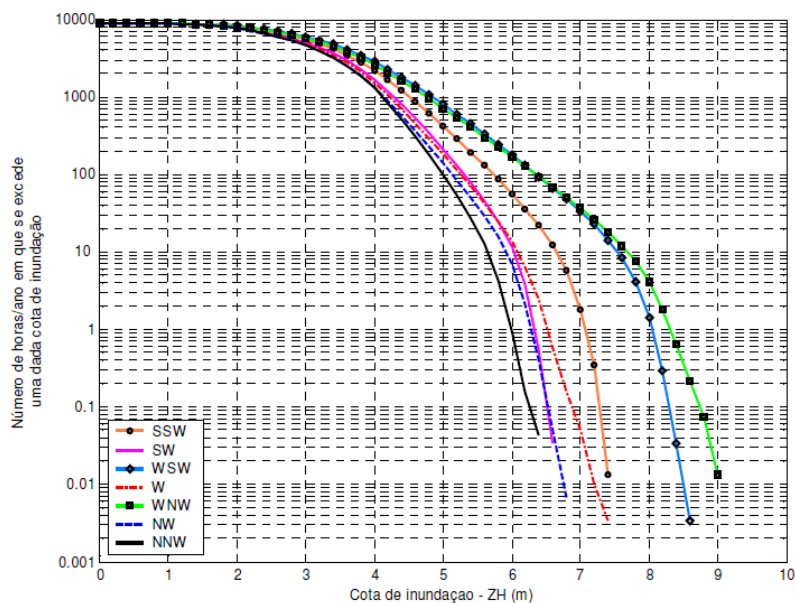


Figura 48 – Regime médio da cota de inundação numa praia dissipativa (Viegas, 2005)

Já na Figura 49 apresenta-se o regime médio da cota de inundação para uma praia refletiva.

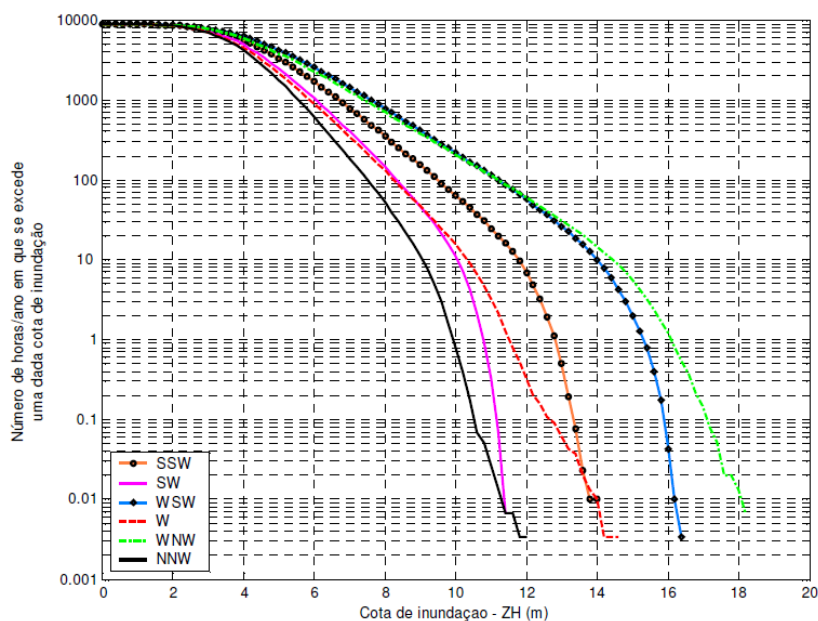


Figura 49 – Regime médio da cota de inundação numa praia refletiva (Viegas, 2005)

Para uma praia refletiva, os resultados obtidos indicam cotas de inundação superiores às de uma praia dissipativa. As direções SSW, WSW e WNW são as que apresentam valores superiores. A diferença de comportamento entre a praia dissipativa e a praia refletiva resulta da diferença dos níveis de espraçamento devido ao declive da praia.

Relativamente ao regime de extremos, e para uma praia dissipativa, os resultados são os apresentados na Figura 50.

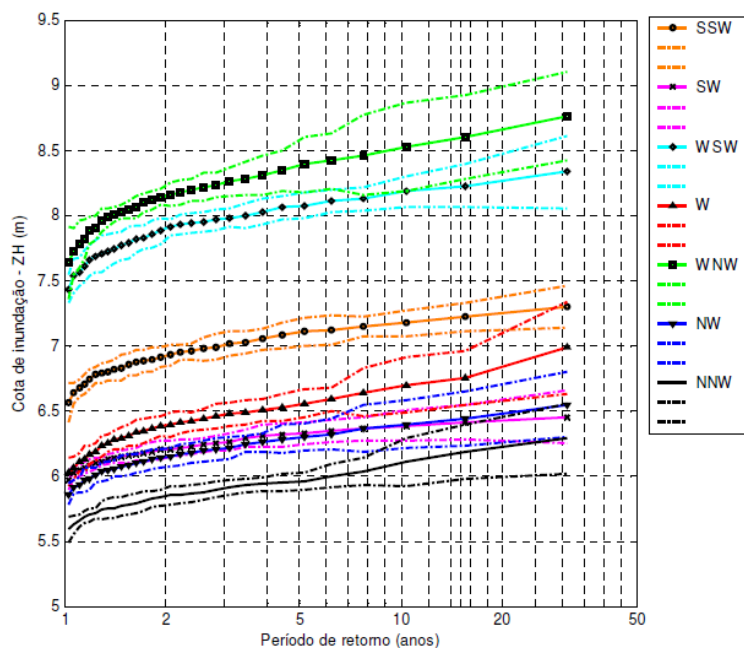


Figura 50 – Regime de extremos da cota de inundação numa praia dissipativa (Viegas, 2005)

Tal como para o regime médio, obtêm-se para o regime de extremos, valores mais elevados das cotas de inundação para ondas provenientes dos setores SSW, WSW e WNW.

É importante também referir que os valores encontrados relativos aos níveis de maré e à cota de inundação também são semelhantes aos que constam no AILPE relativos à “ÁREA – III, Subzona – a”, Figura 51.

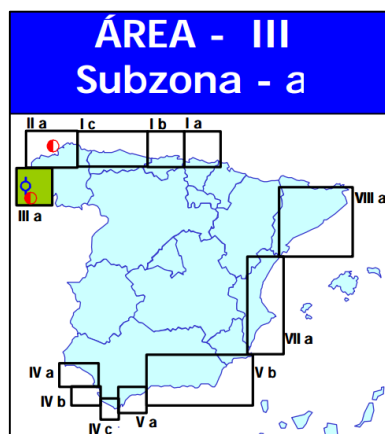


Figura 51 – Enquadramento da “ÁREA- III, Subzona – a” (adaptado de AILPE, 2000)

Isto deve-se ao facto do troço costeiro, em análise neste trabalho, estar relativamente próximo do referido e estar sujeito a condições de agitação marítima e maré semelhantes. Note-se que os dados de base utilizados na “ÁREA-III, Subzona – a” referem-se ao marégrafo de Vigo que se situa a aproximadamente 120 km do marégrafo de Leixões.

As maiores diferenças são no regime de extremos da cota de inundação, Figura 52. Os valores de regime de extremos parecem ser algo inferiores ao expectável e ao apresentado pelo AILPE. Tal justificação pode residir no método de cálculo utilizado para o espraimento que consiste na aplicação das expressões 2.16, 2.17 e 2.18.

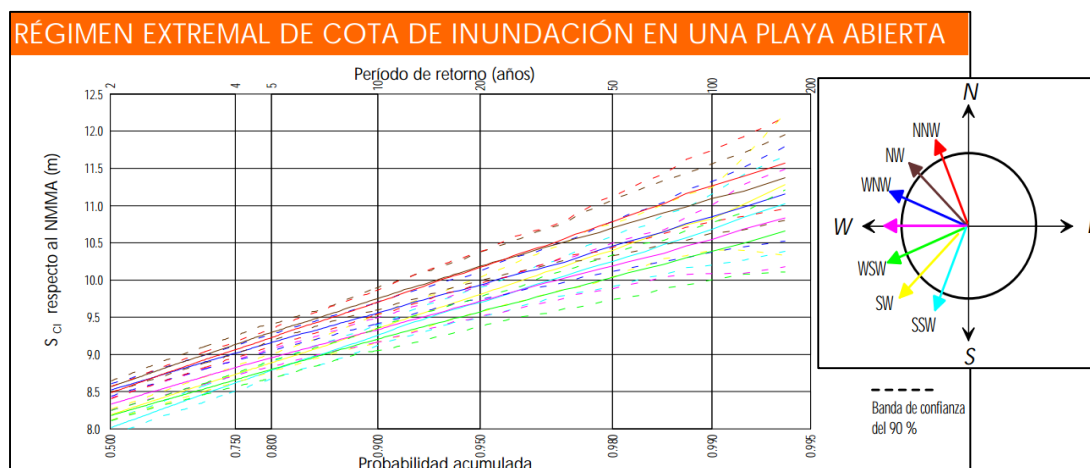


Figura 52 – Régimen extremos de cota de inundação para a “ÁREA III – Subzona a” (adaptado de AILPE, 2000)

Como exemplo de aplicação das expressões 2.16, 2.17 e 2.18, a uma probabilidade de excedência de 1% e  $L_{Ru} = 2\text{m}$  (correspondente a um temporal com  $H_{rms} = 4\text{m}$ , i.e.,  $H_s = 5.6\text{m}$  e  $T = 16\text{s}$ ), corresponde um espraimento de aproximadamente 4.3m acima do nível médio.

Uma outra forma de quantificar o *run-up* para um dado período de retorno é pela leitura dos gráficos obtidos. Após leitura do gráfico da Figura 51, para uma agitação marítima proveniente de WSW e um período de retorno de 20 anos, verifica-se que a cota de inundação é de aproximadamente 8.25m (contribuição da maré astronómica, sobrelevação meteorológica e *run-up*) para uma praia dissipativa. Para o mesmo período de retorno é possível obter os níveis de maré (contribuição da maré astronómica e sobrelevação meteorológica), Figura 45, que toma o valor de aproximadamente 4.4 m. Assim sendo o *run-up* resulta da diferença entre estas duas componentes a que corresponde um valor de 3.85 m.

Já o método presente no AILPE é diferente, ou seja, para estados de mar com a duração de uma hora, é calculado o número de ondas por hora, e a partir daí são determinados os *run-up* consecutivos, tendo em conta que cada *run-up* depende do anterior, com uma determinada função de distribuição.

Se for utilizado o método no AILPE para o cálculo do *run-up*, a quantificação da cota de inundação numa determinada praia em que exista também um passeio marítimo pode ser feita de uma forma relativamente expedita, como a seguir se exemplifica para um caso específico.

Nos temporais do inverno de 2014 houve registo de vários galgamentos no troço costeiro em estudo. Um desses casos, já descrito em 3.4.2., foram as inundações registadas na Avenida dos Banhos no município da Póvoa de Varzim, Figura 53.

Observando novamente a Figura 12, é possível perceber facilmente o procedimento a adotar para determinar a altura de água que atingiu, por exemplo, o passeio marítimo da Avenida dos Banhos.



Figura 53 – Avenida dos Banhos no município da Póvoa de Varzim (Google Earth, 2015)

Para tal é necessário perceber, inicialmente, se o declive da praia, neste caso da Praia Azul, terá uma grande influência no espraçamento.

Com o auxílio do *software Global Mapper v16.1*, obteve-se o perfil transversal da praia, Figura 54.

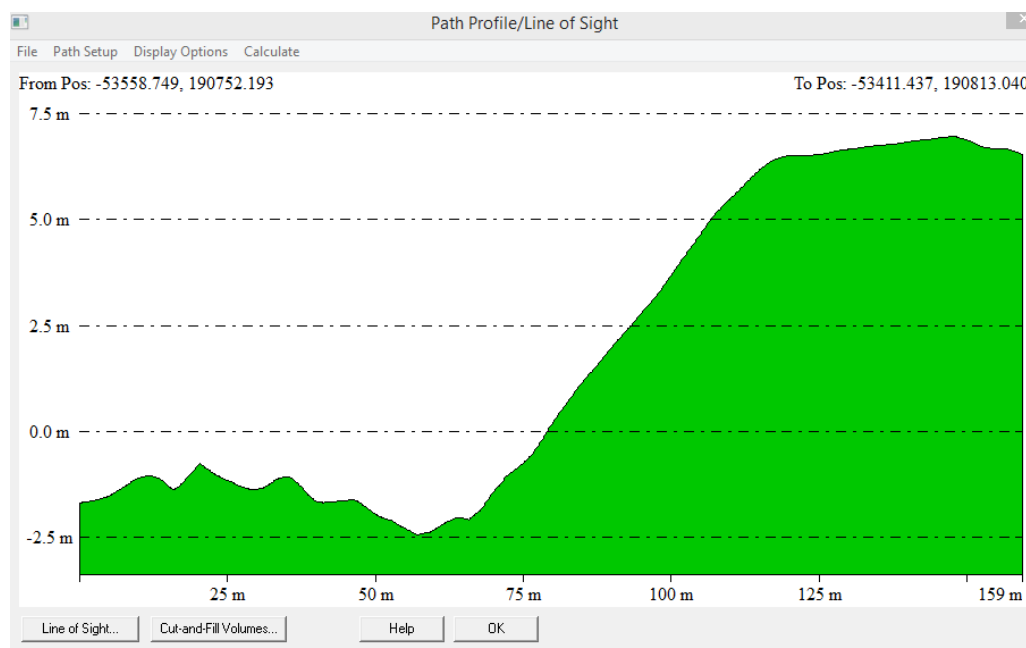


Figura 54 – Perfil transversal da Praia Azul obtido pelo *Global Mapper v16.1*.

Para um período de retorno de 20 anos, para uma direção de agitação marítima proveniente do setor WSW e pela leitura do gráfico da Figura 52 verifica-se que a cota de inundação no regime de extremos é de aproximadamente 9.5 m.

O nível de maré obtido pela leitura do gráfico da Figura 44 (igualmente para regime de extremos) é de aproximadamente 4.4 m.

O valor de  $R_{u_0}$  é dado então pela diferença entre a cota de inundação e do nível de maré no regime de extremos e que toma o valor de 5.1m.

O *run-up* ( $R_u$ ) final é obtido pela seguinte expressão,

$$R_u = R_{u_0} * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_w \quad (4.1)$$

em que  $\gamma_f$  é o parâmetro que tem em consideração a rugosidade e que tomará o valor de 1.05 (visto tratar-se de uma zona pavimentada e de acesso a habitações),  $\gamma_w$  o parâmetro que considera a percolação e que tomará o valor 1 (visto que se assume que não há percolação) e  $\gamma_b$  o parâmetro que considera o declive dos alinhamentos e é dado pela seguinte expressão,

$$\gamma_b = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \quad (4.2)$$

$$0.6 < \gamma_b < 1$$

Desta forma e, analisando igualmente o perfil transversal da praia, a inclinação média da praia corresponde aproximadamente a  $\tan \alpha = 0.068$ .

A inclinação média do passeio marítimo pode ser também obtida a partir do seu perfil transversal, Figura 55. A diminuição da altura no início do perfil transversal apresentado deve-se à existência de um muro, tal como se verifica na Figura 53.

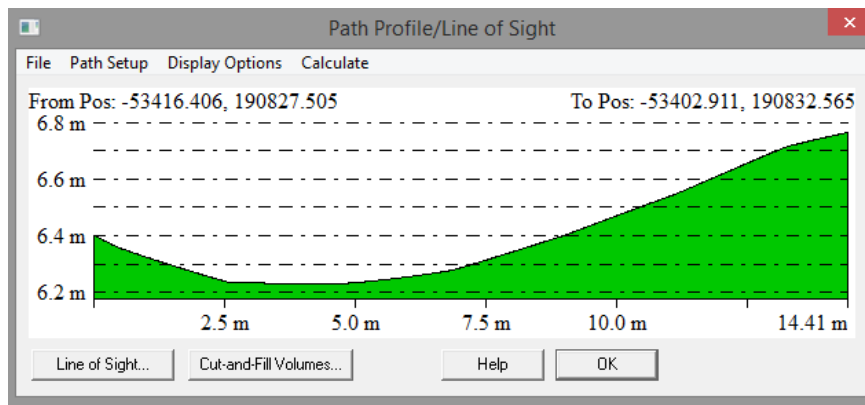


Figura 55 – Perfil transversal do passeio marítimo obtido pelo *Global Mapper* v16.1.

Assim sendo a inclinação média do passeio marítimo corresponde aproximadamente a  $\tan \beta = 0.04$ . Com as inclinações médias dos dois alinhamentos é possível calcular o parâmetro  $\gamma_b$  pela expressão 4.2 ( $\gamma_b = 0.646$ ), verificando-se o cumprimento da condição  $0.6 < \gamma_b < 1$ .

Com a definição de todos os parâmetros, o valor do *run-up* ( $R_u$ ) toma o valor aproximado de 3.46 m.

É ainda possível estimar a distância ( $x$ ), em metros, que a lâmina de água percorre desde o início do passeio marítimo. Para tal, o AILPE sugere a seguinte expressão,

$$x = \frac{R_u}{\tan \beta} \quad (4.3)$$

Assim conclui-se que, nas condições definidas anteriormente, a lâmina de água percorre uma distância de aproximadamente 51m, muito maior que a largura da Avenida dos Banhos (incluindo passeio marítimo, ciclovias, faixas de rodagem e estacionamento).

#### 4.4. GALGAMENTOS EM OBRAS MARÍTIMAS

Como já foi mencionado no Capítulo 2, quando se estuda o *run-up* em praias, estas são diferenciadas quanto à existência ou não de estruturas de proteção instaladas. Estas construções alteram a morfologia e dinâmica das praias, conferindo-lhes características distintas, que interferem com vários fenómenos, entre eles o *run-up*.

Assim, nos casos em que existam estruturas de defesa como quebra-mares opta-se por estudar o galgamento destas, uma vez que será este fenómeno o mais suscetível de causar danos em estruturas, pessoas e bens.

O galgamento é um fenómeno de grande importância no contexto da interação onda-estrutura e, em grande parte das situações, um condicionante para o dimensionamento de obras marítimas. Dado o carácter irregular da agitação marítima que solicita as estruturas costeiras, a multiplicidade dos tipos e soluções construtivas destas e os diferentes materiais utilizados, a avaliação do galgamento é um processo complexo que, em rigor, deveria ser efetuado especificamente para cada situação. No entanto, o estudo de cada obra em separado é dispendioso e demorado pelo que, em geral, são utilizadas expressões empíricas e semiempíricas baseadas em situações semelhantes e ensaiadas em laboratório. Como já foi apresentado no capítulo 2 existem diversas formulações deste tipo (mesmo para perfis de elevada complexidade), mas todas elas têm limites de aplicabilidade.

Ao determinar a cota de coroamento e a forma da superestrutura destas mesmas obras, o galgamento influencia significativamente o seu custo, eficiência e impacto visual. A importância do estudo deste fenómeno deve-se às consequências que este pode ter, especialmente em situações em que se conjugam a ocorrência de temporais, onde a rebentação é mais violenta, com sobrelevações do nível do mar, como seja a preia-mar de águas vivas.

Reconhecendo a importância do tema em análise, incluindo a relevância social, a União Europeia financiou entre 2002 e 2004 um projeto de investigação, denominado CLASH, cujo principal propósito era melhorar o conhecimento sobre o galgamento de estruturas costeiras, nos seus múltiplos aspetos. Para tal, foi efetuado um conjunto de medidas em campo do volume galgado, em três locais diferentes, bem como ensaios em laboratório.

Deste modo pretende-se, com a análise seguinte, aplicar as formulações empíricas (mencionadas no Capítulo 2) e o modelo da rede neuronal NN\_OVERTOPPING2 a uma estrutura pertencente ao troço costeiro em estudo. Será também efetuada uma análise comparativa entre estes dois métodos.

##### 4.4.1. QUEBRAMAR SUL DO PORTINHO DE VILA PRAIA DE ÂNCORA

O portinho de pesca de Vila Praia de Âncora fica situado na freguesia de Vila Praia de Âncora, pertencente ao concelho de Caminha, Figura 56. Desde sempre que a povoação de Vila Praia de Âncora teve a sua economia ligada à atividade piscatória, sendo a pesca do bacalhau uma das principais. O porto está equipado com uma rampa de varadouro e armazéns de apoio à principal atividade económica. Após a intervenção de 2001 ficou redefinido o molhe norte e sul. Até então, a agitação marítima local provocava grandes estragos.





Figura 56 – Enquadramento do quebramar sul do portinho de pesca de Vila Praia de Âncora (Google Earth, 2015)

Contudo, são ainda vários os galgamentos registados neste local ao longo dos anos, inclusive no temporal do inverno de 2014, Figura 57, onde se verificou também o galgamento do mar sobre a Avenida Dr. Ramos Pereira.



Figura 57 – Galgamento do quebramar no temporal do inverno de 2014 [7]

Com a seguinte análise ao galgamento pretende-se comparar os valores do caudal médio de galgamento obtidos pelas formulações empíricas de Owen (1980) e pela ferramenta de cálculo NN\_OVERTOPPING2 baseada em redes neuronais. De salientar ainda que toda a análise incidirá sobre o quebramar sul do respetivo porto cujo perfil transversal se apresenta na Figura 58. De uma forma mais pormenorizada, todas as características relativas a esta estrutura estão descritas no Quadro 17.



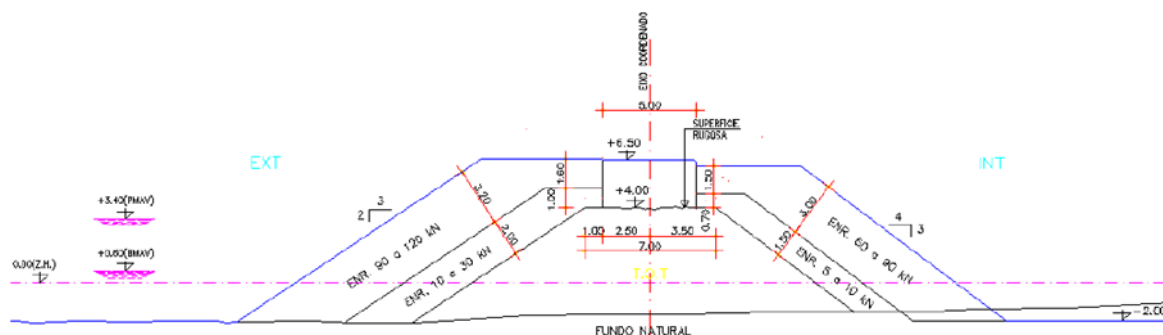


Figura 58 – Perfil transversal do quebramar sul do Portinho de Vila Praia de Âncora (Teixeira, 2012)

Quadro 17 - Características do quebramar sul do Portinho de Vila Praia de Âncora (adaptado de Teixeira, 2012)

Quebramar Sul do Porto de Vila Praia de Âncora	
Função	Proteção
Tipo	Taludes
Orientação	Oeste
Comprimento	165m
Cota de Coroamento	+6.5m (ZH)
Largura da Superestrutura	5m
Profundidade Máxima	-4.0m (ZH)
Talude Extradorso	
Blocos do Manto	Enrocamento
Cota Máxima do Manto	+6.8m (ZH)
Peso Blocos do Manto	90 a 120 kN
Inclinação	2:3
Talude Intradorso	
Blocos do Manto	Enrocamento
Cota Máxima do Manto	+6.20m (ZH)
Peso Blocos do Manto	60 a 90 kN
Inclinação	3:4

#### 4.4.1.1 Caudal médio de galgamento pela formulação de Owen (1980)

De acordo com a formulação empírica de Owen (1980) para estruturas simples de talude permeável (que é a que mais se aproxima do quebramar em estudo), introduziram-se os seguintes parâmetros de entrada, tentando reproduzir com a maior fidelidade possível o perfil da estrutura em análise.

- Nível de maré: +3.5m ZH (preia-mar)
- Altura livre do quebramar ( $R_c$ ): 3m
- Período da onda na base do talude ( $T_m = \frac{T_p}{1.2}$ ): 10.0s e 11.7s
- Alturas de onda significativa na base do talude ( $H_{m0}$ ): 1,2, 3 e 4m
- Coeficientes empíricos ( $A$  e  $B$ ) que dependem do perfil do quebramar:  $A=0.0084$  e  $B=19.9$  (para uma inclinação de 2:3)
- Ângulo de incidência da agitação ( $\beta$ ):  $0^\circ$  (perpendicular à estrutura)
- Comprimento do coroamento permeável ( $C_w$ ): 7m
- Coeficiente de rugosidade ( $r$ ): 0.5

Apresentam-se os resultados do caudal médio de galgamento,  $q$ , no Quadro 18, para as várias hipóteses acima indicadas. Neste quadro apresenta-se também o bordo livre adimensionalizado,  $R^*$ , confirmando-se a aplicabilidade desta formulação para o quebramar em estudo através da verificação ( $0.05 < R^* < 0.30$ ).

Quadro 18 – Cálculo do caudal médio de galgamento segundo Owen (1980)

Nível de maré (m) ZH	$T_p$ (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	$T_m$ (s)	$H_{m0}$ (m)	$R^*$ (-)	$q$ (L/s/m)
+3.5 (preia-mar)	12.0	10.9	10.0	1.0	0.0958	0.0113
				2.0	0.0677	6.5745
				3.0	0.0553	62.0498
				4.0	0.0509	199.9081
	14.0	12.7	11.7	1.0	0.0819	0.0230
				2.0	0.0579	11.3809
				3.0	0.0513	99.9621
				4.0	0.0500	280.5426

No Anexo C apresenta-se um exemplo de introdução de dados utilizada na folha de cálculo utilizada para estimar o caudal médio de galgamento através da formulação empírica de Owen (1980).

#### 4.4.1.2. Caudal médio de galgamento pela Ferramenta de Cálculo NN\_OVERTOPPING2

Calculou-se igualmente o caudal médio de galgamento através de uma ferramenta baseada na análise de redes neurais, NN\_OVERTOPPING2, que considera 15 parâmetros de entrada para definir a estrutura e as condições de agitação.

Esta ferramenta tem como principal vantagem a facilidade de utilização e obtenção de resultados, dispensando-se um conhecimento aprofundado em redes neurais para a sua utilização. Pode ser utilizada com quase todas as geometrias da estrutura e é relativamente simples calcular variantes quer

na geometria, quer nas condições de agitação, obtendo-se vários resultados ao invés de ter apenas uma resposta para cada utilização das redes.

Apresentam-se de seguida os parâmetros de entrada (*input*), sendo que os primeiros três parâmetros são de carácter hidráulico e os restantes de carácter estrutural.

- Nível de maré: +3.5m ZH (preia-mar)
- Ângulo de incidência da agitação ( $\beta$ ): 0° (perpendicular à estrutura)
- Altura de onda significativa na base do talude ( $H_s=H_{m0}$ ): 1, 2, 3 e 4m
- Período da onda espectral na base do talude ( $T_{m-1.0} = \frac{T_p}{1.1}$ ): 10.9s e 12.7s
- Profundidade da água em frente à estrutura ( $h$ ): 8.50m
- Profundidade da água no pé do talude da estrutura ( $h_t$ ): 8.50m
- Largura do pé do talude ( $B_t$ ): 0m
- Rugosidade/permeabilidade do manto ( $\gamma_f$ ): 0.5
- Declive da estrutura abaixo da berma ( $cota_d$ ): 1.5
- Declive da estrutura acima da berma ( $cota_u$ ): 1.5
- Largura da berma ( $B$ ): 0m
- Profundidade da água na berma ( $h_b$ ): 0m
- Declive da berma ( $tana_b$ ): 0
- Bordo livre ( $R_c$ ): 3m
- Distância entre o meio da berma de coroamento e o nível de água ( $A_c$ ): 3m
- Largura do coroamento da estrutura ( $G_c$ ): 7m

No Anexo D encontra-se o ficheiro *input* utilizado no cálculo do caudal médio de galgamento pela ferramenta NN\_OVERTOPPING2.

O Quadro 19 apresenta os resultados dos caudais médios de galgamento para as várias hipóteses indicadas anteriormente. Neste quadro são ainda apresentados resultados relativos aos caudais médios de galgamento por metro linear da estrutura correspondentes aos quantis de ordem 5% e 95%.

Quadro 19 – Cálculo do caudal médio de galgamento pela ferramenta NN\_OVERTOPPING2

Nível de maré (m) ZH	$T_p$ (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	Identificação do cenário	$H_{m0}$ (m)	$q$ (L/s/m)	$q_{5\%}$ (L/s/m)	$q_{95\%}$ (L/s/m)
+3.5 (preia-mar)	12.0	10.9	scen 1	1.0	0.1269	0.004258	4.825
			scen 2	2.0	1.216	0.203	8.958
			scen 3	3.0	10.81	3.143	34.9
			scen 4	4.0	56.93	20.76	155.7
	14.0	12.7	scen 5	1.0	0.499	0.02228	15.12
			scen 6	2.0	2.302	0.274	23.4
			scen 7	3.0	17.98	4.741	66.47
			scen 8	4.0	86.89	30.24	258.9

Um dos *outputs* apresentados pelo programa é a representação gráfica dos valores gerados pela ferramenta de cálculo relativos aos caudais médios de galgamento correspondentes aos quantis de ordem 5% e 95%, Figura 58.

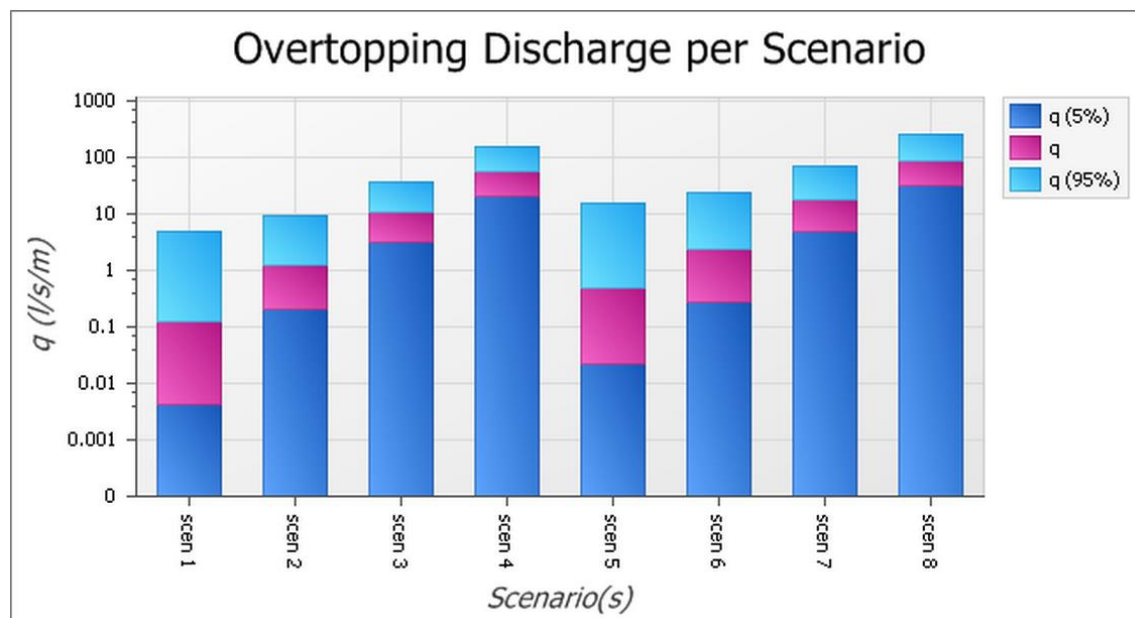


Figura 59 – Caudais médios de galgamento correspondentes aos quantis de ordem 5% e 95% pela ferramenta de cálculo neuronal NN\_OVERTOPPING2

#### 4.4.2. ANÁLISE COMPARATIVA DOS DIFERENTES MÉTODOS

Os resultados obtidos através da ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2 são, para os maiores caudais, inferiores aos valores de referência e para pequenos caudais não apresentam nenhuma tendência evidente. Convém igualmente realçar o facto do intervalo de confiança de 95% apresentar uma grande variação como se pode observar na Figura 59.

A formulação de Owen (1980) é o método mais conservativo, uma vez que, para as mesmas alturas de onda e o mesmo período da onda na base do talude, resultam caudais médios de galgamento superiores aos obtidos pela ferramenta de cálculo NN\_OVERTOPPING2. De salientar ainda que a geometria da estrutura analisada assemelha-se à geometria que esteve na base da formulação de Owen (1980) e por outro lado, as condições de agitação seleccionadas encontram-se dentro dos limites de aplicação da formulação.

No entanto, a flexibilidade que é dada pelas ferramentas na análise do caudal de galgamento de diferentes soluções estruturais, torna-as especialmente atrativas, por exemplo, em fase de Estudo Prévio destas obras de engenharia. Como já foi mencionado anteriormente, para o projeto de execução de uma obra marítima devem ser confirmados os valores previstos pela ferramenta recorrendo a modelos físicos reduzidos para as condições de agitação marítima e a geometria específica da estrutura.

Outro critério importante no dimensionamento de uma estrutura marítima, numa avaliação de risco ou num sistema de previsão e alerta de ocorrência de galgamentos é o valor admissível de galgamento. Neste trabalho, procurou utilizar-se as diretivas existentes (Pullen *et al.*, 2007) e que têm em conta as

diversas utilizações da zona galgada. O estabelecimento do valor crítico do caudal médio de galgamento depende das consequências do galgamento, da natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, do perfil da estrutura galgada e da necessidade de garantir a segurança de pessoas e infraestruturas localizadas nessa zona.

A situação mais crítica resulta da formulação de Owen (1980) em que para um nível de maré +3.5 m Z.H., um período de pico de 14s e uma altura de onda de 4.0m, o caudal médio de galgamento previsto é de 280.5 L/s/m. Numa situação como a descrita e, segundo os Quadros 2 a 5, a estrutura sofrerá danos significativos, sem possibilidade de circulação de pessoas e veículos nas imediações; e os barcos, edifícios e equipamentos localizados na zona abrigada pela estrutura também serão atingidos.



# 5

## CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do trabalho procurou-se apresentar e quantificar cada uma das componentes responsáveis pelos níveis de inundação obtidos. Assume-se que o nível do mar resulta da soma do nível de maré astronómica (processo determinístico), com a sobrelevação de origem meteorológica e o espraçamento das ondas (ambos processos probabilísticos).

Os níveis de marés obtidos, tendo em consideração os dados registados no marégrafo de Leixões entre 2003 e 2013, vão de encontro ao esperado no troço costeiro em estudo e são relativamente próximos dos apresentados em estudos de outros autores.

No entanto, é importante referir que, estando o marégrafo do Porto de Leixões localizado no interior de uma zona portuária, e, portanto, numa massa de água confinada pelos quebramares e pelos cais, as contribuições da sobrelevação meteorológica poderão ser mais elevadas. Relativamente ao estudo da agitação marítima, foram utilizadas as conclusões retiradas por Viegas (2005) que se basearam nos dados de agitação marítima da boia de Leixões entre 1996 e 2001. Note-se que um período mais alargado para o desenvolvimento desta matéria e com dados de agitação marítima correspondentes ao mesmo período em que foi feito o estudo dos níveis de maré, traria resultados com uma maior fiabilidade.

Os valores obtidos para o *run-up* seriam certamente diferentes, uma vez que relativamente à componente da maré astronómica e da sobrelevação meteorológica não há diferenças significativas.

Ainda assim convém referir algumas das simplificações consideradas nos resultados da agitação marítima assumidos; entre as quais, importa destacar o facto de os regimes de cota de inundação em praias terem sido obtidos assumindo que a propagação da agitação marítima se faz numa batimetria reta e paralela. Convém também referir que as fórmulas para o cálculo do espraçamento são diferentes das que constam no AILPE, uma vez que neste último, para estados de mar com a duração de uma hora, é calculado o número de ondas por hora, e a partir daí são determinados os *run-up* consecutivos, tendo em conta que cada *run-up* depende do anterior, com uma determinada função de distribuição.

Comparando os regimes de cota de inundação apresentados no AILPE, para a zona mais próxima do troço costeiro em estudo (cuja base de dados é retirada das leituras do marégrafo de Vigo), com os regimes de cota de inundação obtidos neste trabalho verifica-se uma discrepância não muito acentuada. Com a quantificação do *run-up* segundo as duas situações, para o caso analisado (Avenida dos Banhos) verificou-se que os valores obtidos também não variam significativamente, sendo que no primeiro caso obteve-se um espraçamento de aproximadamente 3.85m e no segundo de aproximadamente 3.46m. Não deixando de realçar novamente o facto de que um estudo destas duas

hipóteses relativas ao cálculo do espraçamento para dados de agitação marítima da boia de Leixões para um período simultâneo ao período de análise dos dados de maré, acarretaria uma maior fiabilidade aos valores obtidos.

Desta forma, tendo em conta os objetivos pretendidos, será importante perceber a utilidade da separação dos níveis calculados para cada direção da onda, quando comparado com a situação em que as direções estão reunidas num único regime médio e de extremos de cotas de inundação. Por exemplo, para fins operacionais (como instalação temporária de instrumentação na praia) talvez seja mais útil perceber o nível máximo atingido para a direção em que a ondulação é mais predominante. Mas para fins de planeamento (como construção de uma estrutura de defesa) talvez o mais importante seja o nível máximo atingido sobre a estrutura, independentemente da direção.

Neste trabalho foi dado um maior ênfase ao estudo de praias dissipativas uma vez que os resultados apresentados para uma praia refletiva deverão ser encarados com alguma reserva, pois a maioria das praias da costa continental portuguesa tem um declive inferior a 1:10. Valores de declives superiores a 1:10 são mais característicos de costas rochosas com pouco suporte sedimentar na plataforma costeira, onde as ondas rebentam sobre a falésia ou próximos, e para as quais a propagação das ondas se faz de uma forma mais complexa.

Para praias em que existam estruturas de proteção instaladas, estas conferem-lhe determinadas especificidades que irão interferir com vários fenómenos, entre eles o *run-up*. Assim, neste trabalho, nos casos em que existem estruturas de defesa, optou-se por estudar o galgamento destas uma vez que será este fenómeno o mais suscetível de causar danos em estruturas, pessoas e bens.

No estudo do galgamento em estruturas foram utilizadas duas metodologias, uma baseada em formulações empíricas e outra baseada numa ferramenta de cálculo neuronal (NN\_OVERTOPPING2). No entanto existem outras sugeridas por diferentes autores, que não devem ser ignoradas.

Assim sendo e, independentemente da metodologia utilizada para a quantificação do caudal médio de galgamento, devem sempre ser confirmados os valores previstos recorrendo a modelos físicos reduzidos para as condições de agitação marítima e a geometria específica da estrutura.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AILPE – Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de Universidad de Cantabria, Atlas de inundación del litoral peninsular español Documento Complementário, Santander: Universidad de Cantabria, 2000.
- Allsop, N. W. H., Besley, P. & Madurini, L. (1995). Overtopping performance of vertical and composite breakwaters, seawalls and low reflection alternatives.
- Almeida, A. (2008). Quantificação do Efeito das Marés Meteorológicas na Costa Oeste Portuguesa. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- APA (2014) – Registo das ocorrências no litoral. Temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014. Relatório Técnico. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Basto, C. (2009). Vulnerabilidade e risco face à erosão costeira entre Aguda e Paramos: Duas metodologias de análise. Dissertação de mestrado, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.
- Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1973). Some comments on a paper by Chatfield and Prothero and on a review by Kendall. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 136(3), 337-352
- Cardoso, A. A. Padrões de Ocupação do Solo em Áreas de Risco natural: o caso do litoral Poveiro, dissertação de mestrado (Gestão de Riscos Naturais). Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, 192p., 2005
- CERC – Coastal Engineering Research Center. Coastal Engineering Manual. Washington. DC. 2002.
- Coelho, C. (2005). Riscos de Exposição Ambiental de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Tese de Doutoramento, Secção Autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Hedges, T., Reis, M. (1998). "Random Wave Overtopping of Simple Sea Walls: A New Regression Model." *Institution of Civil Engineers Maritime & Energy* (11390
- Hedges, T.S., Shareef, M. (2002). Predicting Seawall Overtopping By Bimodal Seas. 28<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, Cardiff, Gales.
- Instituto Hidrográfico (2005). Caracterização da Maré do Porto de Leixões. Relatório de Progressos de Trabalhos. Direção Técnica/Divisão de Oceanografia.
- Leatherman, S. (2003). Shoreline change mapping and management along the U.S. East Coast. *Journal of Coastal Research*, (38): 5-13. Número especial.
- Lopes, H. (2005). Ensaio em modelo físico do comportamento hidráulico e estrutural do quebramar norte do Porto de Leixões. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (2013). Litoral 2007-2013: Avaliação dos Planos de Ordenamento da Orla Costeira e Proposta de Actuação. Lisboa, Portugal.

Nielsen, P., Hanslow, D.J., (1991). Wave Runup Distributions on Natural Beaches, *Journal of Coastal Research*, 7(4), 1139-1152.

Owen, M. W. (1980). Design of Seawalls allowing for Wave Overtopping, Report No. EX 924, HR Wallingford.

Owen, M. W., and Steele, A.J. (1991). Effectiveness of Recurved Wave Return Walls, HR Wallingford.

Pawlowicz, R., Beardsley B., Lentz S. (2011), Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers and Geosciences*.

Pullen, T. & Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H. & Van der Meer, J.W. (2007). Eurotop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, August.

Ruggiero, P., P.D. Komar, W.G. McDougal, J.J. Marra, and R.A. Beach. 2001. Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of Properties Backing Beaches. *Journal of Coastal Research* 17(2):407-419

Ruggiero, P.; Kaminsky, G.M.; Komar, P.D.; and MCDOUGAL, W.G., (1997). Extreme waves and coastal erosion in the Pacific Northwest. *Ocean Wave Measurements and Analysis*, Proceedings of the 3rd International Symposium, Waves '97, pp 947-961.

Taborda, R. & Dias, J. A. (1992) - Análise da Sobreelevação do Mar de Origem Meteorológica durante os Temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. *Geonovas*, Nº Especial 1 "A Geologia e o Ambiente", p.89-97, Lisboa

Teixeira, R. (2012). Quebramares portugueses. Inventário e análise comparativa de soluções. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Van der Meer, J.W. and J. Janssen (1995). Wave run-up and wave overtopping at dikes. Wave forces on inclined and vertical wall structures. ASCE. pp.1-27

Viegas, T. (2005). Níveis de Inundação em Zonas Costeiras: Metodologia de Cálculo. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

[1] <http://www.poseidon.pt/meteorologia/as-mares/>. Acedido em Março de 2015.

[2] <https://www.ipma.pt/pt/otempo/prev.numerica/>. Acedido em Março de 2015.

[3] <http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>. Acedido em Maio de 2015.

[4] <http://www.caminha2000.com/jornal/n175/cmc.html>. Acedido em Março de 2015.

[5] [http://lugar-pedrinhas.blogspot.pt/2014/02/avanco-do-mar-ameaca-torres-de-ofir\\_6.html](http://lugar-pedrinhas.blogspot.pt/2014/02/avanco-do-mar-ameaca-torres-de-ofir_6.html). Acedido em Março de 2015.

[6] <http://www.doovi.com/video/reportagem-mar-invade-avenida-dos-banhos06012014/rBBJ8L8hiH8>.  
Acedido em Março de 2015.

[7] <http://jornalc.pt/portinho-de-vila-praia-de-ancora-passa-para-maos-da-docapesca/>. Acedido em  
Abril 2015

## **ANEXOS**

ANEXO A – FICHEIRO DE SAÍDA DO SOFTWARE ' <i>TIDAL ANALYSIS TOOLBOX</i> ' .....	81
ANEXO B – CÁLCULO DO REGIME MÉDIO DOS NÍVEIS DE MARÉ ATRAVÉS DO PROGRAMA ESCRITO EM <i>MATLAB</i> , MNIVMED.M .....	85
ANEXO C - EXEMPLO DE INTRODUÇÃO DE DADOS UTILIZADA NA FOLHA DE CÁLCULO UTILIZADA PARA ESTIMAR O CAUDAL MÉDIO DE GALGAMENTO ATRAVÉS DA FORMULAÇÃO EMPÍRICA DE OWEN (1980). ....	89
ANEXO D - FICHEIRO <i>INPUT</i> UTILIZADO NO CÁLCULO DO CAUDAL MÉDIO DE GALGAMENTO PELA FERRAMENTA NN_OVERTOPPING2 .....	93



## **Anexo A - Ficheiro de saída do software “*Tidal Analysis Toolbox*”.**



```

1 -----
2 date: 22-Jun-2015
3 nobs = 96360,  ngood = 90592,  record length (days) = 4015.00
4 start time: 01-Jan-2003
5 rayleigh criterion = 1.0
6 Greenwich phase computed with nodal corrections applied to
  amplitude \n and phase      relative to center time
7
8 x0= 2.18, x trend= 0
9
10 var(x)= 0.65145    var(xp)= 0.53102    var(xres)= 0.12042
11 percent var predicted/var original= 81.5 %
12
13      tidal amplitude and phase with
14 95% CI estimates
15
16 tide  freq      amp      amp_err    pha    pha_err    snr
17 *SA    0.0001141    0.0371    0.012    306.69    21.20    9.1
18 *SSA   0.0002282    0.0357    0.013    67.98    18.47    8
19 MSM    0.0013098    0.0066    0.011    222.15    108.13    0.39
19 MM     0.0015122    0.0086    0.010    255.09    82.97    0.78
20 MSF    0.0028219    0.0060    0.010    95.26    124.93    0.39
21 MF     0.0030501    0.0064    0.010    84.95    108.00    0.42
22 ALP1   0.0343966    0.0006    0.001    302.51    112.08    0.59
23 *2Q1   0.0357064    0.0018    0.001    279.12    34.70    2.3
24 *SIG1  0.0359087    0.0026    0.001    299.60    23.68    5
25 *Q1    0.0372185    0.0128    0.001    318.91    5.41    1.2e+02
26 *RHO1  0.0374209    0.0030    0.001    328.75    20.87    5.6
27 *O1    0.0387307    0.0501    0.001    353.35    1.48    2.4e+03
28 TAU1   0.0389588    0.0017    0.002    47.96    54.36    0.96
29 BET1   0.0400404    0.0008    0.001    39.92    77.23    0.64
30 *NO1   0.0402686    0.0063    0.002    19.70    17.78    13
31 CHI1   0.0404710    0.0007    0.001    19.09    110.38    0.56
32 *PI1   0.0414385    0.0023    0.001    41.00    35.35    3.1
33 *P1    0.0415526    0.0216    0.001    51.37    3.72    3.1e+02
34 *S1    0.0416667    0.0075    0.002    225.01    14.76    12
35 *K1    0.0417807    0.0664    0.001    59.41    0.94    2.9e+03
36 *PSI1  0.0418948    0.0016    0.001    77.07    48.36    1.8
37 PHI1   0.0420089    0.0011    0.001    50.71    84.11    0.59
38 THE1   0.0430905    0.0003    0.001    84.52    160.75    0.11
39 *J1    0.0432929    0.0021    0.001    58.40    31.48    3.9
40 SO1    0.0446027    0.0004    0.001    30.34    143.48    0.25
41 OO1    0.0448308    0.0006    0.001    166.39    80.68    0.74
42 UPS1   0.0463430    0.0003    0.001    330.59    156.36    0.2
43 OQ2    0.0759749    0.0008    0.007    359.14    211.48    0.012
44 EPS2   0.0761773    0.0071    0.009    92.02    89.73    0.61
45 *2N2   0.0774871    0.0189    0.010    114.39    29.30    3.7
46 *MU2   0.0776895    0.0291    0.012    103.97    25.18    5.9
47 *N2    0.0789992    0.1790    0.012    116.11    3.92    2.2e+02
48 *NU2   0.0792016    0.0419    0.012    117.24    14.13    12
49 GAM2   0.0803090    0.0067    0.011    139.93    96.82    0.39
50 *H1    0.0803973    0.0158    0.012    223.33    42.07    1.8

```



51	*M2	0.0805114	0.9623	0.012	113.12	0.64	6.5e+03
52	*H2	0.0806255	0.0151	0.012	88.31	45.82	1.7
53	MKS2	0.0807396	0.0062	0.008	344.30	87.58	0.58
54	*LDA2	0.0818212	0.0122	0.012	98.26	55.60	1
55	*L2	0.0820236	0.0154	0.009	99.52	33.72	2.9
56	*T2	0.0832193	0.0271	0.011	106.62	24.58	6.3
57	*S2	0.0833333	0.3606	0.011	102.14	1.79	1e+03
58	R2	0.0834474	0.0021	0.007	75.18	166.74	0.095
59	*K2	0.0835615	0.0946	0.010	102.38	5.10	94
60	MSN2	0.0848455	0.0019	0.008	295.01	177.61	0.054
61	ETA2	0.0850736	0.0021	0.005	117.74	161.76	0.17
62	*MO3	0.1192421	0.0005	0.000	18.89	29.12	3.9
63	*M3	0.1207671	0.0046	0.000	353.83	3.58	2.5e+02
64	*SO3	0.1220640	0.0004	0.000	36.08	39.49	2.9
65	*MK3	0.1222921	0.0008	0.000	329.77	16.36	12
66	*SK3	0.1251141	0.0022	0.000	15.93	6.90	70
67	*MN4	0.1595106	0.0015	0.000	269.62	9.22	41
68	*M4	0.1610228	0.0044	0.000	306.13	3.18	2.8e+02
69	*SN4	0.1623326	0.0005	0.000	334.70	25.29	5
70	*MS4	0.1638447	0.0041	0.000	349.31	3.09	3.2e+02
71	*MK4	0.1640729	0.0013	0.000	349.21	8.12	35
72	*S4	0.1666667	0.0007	0.000	23.76	19.89	7.6
73	*SK4	0.1668948	0.0003	0.000	54.33	33.53	3.2
74	*2MK5	0.2028035	0.0004	0.000	64.43	22.30	6.3
75	2SK5	0.2084474	0.0001	0.000	236.08	98.68	0.55
76	*2MN6	0.2400221	0.0004	0.000	246.15	28.71	3.6
77	*M6	0.2415342	0.0011	0.000	262.27	13.16	22
78	*2MS6	0.2443561	0.0020	0.000	301.59	6.27	76
79	*2MK6	0.2445843	0.0003	0.000	295.33	29.27	3.7
80	*2SM6	0.2471781	0.0006	0.000	351.77	22.35	7.1
81	*MSK6	0.2474062	0.0003	0.000	336.14	36.94	2.5
82	3MK7	0.2833149	0.0000	0.000	7.82	149.47	0.1
83	*M8	0.3220456	0.0003	0.000	66.42	48.90	1.7

## **Anexo B - Cálculo do regime médio dos níveis de maré através do programa escrito em *MatLab*, *mnivmed.m***



```
%obtem o regime medio de nivel de mare em mar aberto, por simulacao

clear;
t1=clock;
[tide, freq, amp, amp_err, pha,
pha_err,snr]=textread('leixoes_03_13out.dat','%5c %f %f %f %f %f
%f','headerlines',16);

zh=2.1769; %nivel medio resultante da analise harmonica

load mare2003_2013.dat;

res_real_f=res_real-mean(res_real);%subtraiu-se ao residuo o seu valor
medio, de modo a eliminar a tendecia

m=armax(res_real_f,[1 1]);

N_anos=11;

nhoras=8760;

nsim=nhoras*N_anos;
a=0;
%reconstituição da mare astronomica com base nas constantes harmonicas

for h=1:nsim
    for d=1:5

        MA_d(d)=(mare_astro(a,amp,freq,pha,zh)); %reconstituição da mare
astronomica com base nas constantes harmonicas
        a=a+0.04;
    end

    MA(h)=max(MA_d);
end

%simulação da sobre elevação meteorologica
MM=(mare_meteo(m,nsim)+mean(res_real));

NM=MA'+MM;

S_NM=sort(NM);

%calculo da probabilidade acumulada
for q=1:length(NM)
    Px(q)=(q/(length(NM)+1));
end

figure(1);
plot(S_NM,Px);grid;%grafico Probabilidade acumulada vs S_NM relativamente
ao nivel medio
xlabel('S N M relativamente ao nivel medio (m)');
ylabel('Probabilidade acumulada');

Nh=8760*(1-Px);
```

```
figure(2);
semilogy(S_NM,Nh);grid; %grafico N° de horas por ano que sesupera a cota
S_N_M vs S_NM relativamente ao nivel medio
xlabel('S_N_M relativamente ao nivel medio (m)');
ylabel('N° de horas por ano que se supera a cota S_N_M');

t2=clock;
e = etime(t2,t1)

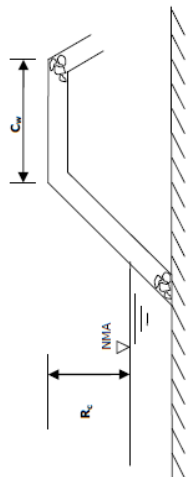
save mnivmed_result_3

disp('FIM');
```

**Anexo C - Exemplo de introdução de dados utilizada na folha de cálculo utilizada para estimar o caudal médio de galgamento através da formulação empírica de Owen (1980).**



## 2. QUEBRAMARES COM TALUDES RUGOSOS



$r=$	0.5	coeficiente de rugosidade (ver tabela abaixo)
$R_c=$	3	altura livre do quebramar (altura do coroamento do quebramar acima do NMA)
$A=$	0.0088	coeficientes empíricos que dependem do perfil do quebramar
$B=$	19.9	
$T_m=$	10	período da onda na base do talude (s)
$g=$	9.8067	aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
$H_{m0}=$	2	altura de onda na base do talude (m)
$C_w=$	7	dimensão do coroamento permeável (m) (ver figura acima)
$C_w/H_s=$	3.5	
$C_r=$	0.0161	coeficiente de redução, de forma a considerar a permeabilidade do coroamento (m)
$Q^*=$	0.0006	caudal adimensional
$R^*=$	0.0677	altura livre adimensional
$Q=$	6.57452	caudal médio de galgamento é obtido pela multiplicação da expressão por $C_r$ (l/s/m)

$$Q^* = A \exp\left(\frac{-BR^*}{r}\right) \quad R^* = \frac{R_c}{T_m(gH_s)^{0.5}}$$

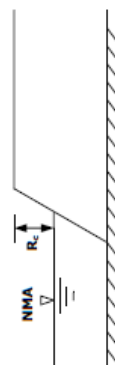
$$Q = Q^* \cdot I_{\text{seg}} \cdot g H_s \quad \text{se } 0.05 < R^* < 0.30.$$

$$C_r = 3.06 \exp\left(-1.5 \frac{C_w}{H_s}\right)$$

Para valores de  $C_w/H_s < 0.75$  assumir  $C_r = 1$

Tipo de talude	Coeficiente de rugosidade, $r$
Betão ou asfalto	1.0
Blocos de betão com pouca drenagem	1.0
Blocos de pedra não compactados	0.95
Em degraus	0.95
Uma camada de enrocamento sobre base impermeável	0.80
Uma camada de enrocamento sobre base permeável	0.55-0.60
Duas camadas de enrocamento	0.50-0.55

$r=$  0.5



Talude	A	B
1:1	7.94E-3	20.1
1:1.5	8.84E-3	19.9
1:2	9.39E-3	21.6
1:2.5	1.03E-2	24.5
1:3	1.09E-2	28.7
1:3.5	1.12E-2	34.1
1:4	1.16E-2	41.0
1:4.5	1.20E-2	47.7
1:5	1.31E-2	55.6

A= 0.008840  
B= 19.9





## **Anexo D - Ficheiro *input* utilizado no cálculo do caudal médio de galgamento pela ferramenta NN\_OVERTOPPING2.**



```

! NN_OVERTOPPING_1.INP
! This is a comment record
! =====
! COLUMN#01 Angle of Wave attack
! COLUMN#02 Water depth in front of structure
! COLUMN#03 Significant Wave Height at the toe of structure
! COLUMN#04 Wave period
! COLUMN#05 Water depth at the toe of structure
! COLUMN#06 Width of toe
! COLUMN#07 Roughness coefficient
! COLUMN#08 Angle of down slope
! COLUMN#09 Angle of upper slope
! COLUMN#10 Crest Freeboard in relation to SWL
! COLUMN#11 Berm Width
! COLUMN#12 Water depth at the berm of the structure
! COLUMN#13 Berm slope
! COLUMN#14 Armour Freeboard in relation to SWL
! COLUMN#15 Armour Width
! =====
! and this is another comment record
! * as well as this one, and the next five ones
! -----
! 0 1 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15
! b h Hm0 Tm-1,0 ht Bt gf cotad cotau Rc B hb tanab Ac Gc
! degr m toe(m) toe(s) m m m m m m m m m
! -----
! Nível +3.50m(ZH); Tp=12s=>Tm-1.0=10.9s
0 8.5 1.0 10.9 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0
0 8.5 2.0 10.9 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0
0 8.5 3.0 10.9 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0
0 8.5 4.0 10.9 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0
!
! Nível +3.50m(ZH); Tp=14s=>Tm-1.0=12.7s
0 8.5 1.0 12.7 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0
0 8.5 2.0 12.7 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0
0 8.5 3.0 12.7 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0
0 8.5 4.0 12.7 8.5 0.0 0.5 1.5 1.5 3.0 0.0 0.0 0.0 3.0 3.0 7.0

```



